

Міністерство освіти і науки України

Кіровоградський національний технічний університет

В.А. Пашинський

**ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ
БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

Навчальний посібник

Кіровоград 2016

Основи теорії надійності будівель і споруд. Навчальний посібник для студентів будівельних спеціальностей усіх форм навчання / В.А Пашинський: – Кіровоград: КНТУ, 2016. – 154 с.

Навчальний посібник орієнтований на вивчення основ теорії надійності магістрантами будівельних спеціальностей. Розглянуті базові поняття теорії надійності, вимоги до надійності будівельних об'єктів та засоби забезпечення надійності, основні показники надійності будівельних конструкцій і виробів, загальні принципи та найпростіші методи їх оцінювання. Значна увага приділена методам імовірнісного подання, визначення розрахункових значень та нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції. Поряд із викладенням теоретичних відомостей розглянуті практичні методи нормування розрахункових параметрів методу граничних станів, які використовуються при проектуванні нових та обстеженнях існуючих будівель і споруд.

Схвалено Вченою радою Кіровоградського національного технічного університету, протокол № 8 від 25 квітня 2016 року.

Рецензент – к.т.н., доцент Хачатурян С.Л.

ВСТУП

Забезпечення надійності технічних об'єктів, у тому числі будівель, споруд та будівельних конструкцій, є актуальною проблемою сьогодення. Відмови можуть викликати не лише дискомфорт чи порушення нормальної експлуатації, але й матеріальні збитки та соціальні втрати до людського життя включно. З розвитком техніки проблема забезпечення надійності постійно загострюється внаслідок підвищення вимог до якості функціонування об'єктів, зростання їх складності, ступеню відповідальності та інтенсивності режимів експлуатації.

Поняття надійності цілком зрозуміле на інтуїтивно-описовому рівні. Говорячи про надійну техніку чи людину, під надійністю розуміють здатність до виконання певних функцій чи зобов'язань. За сучасним визначенням, надійністю називають властивість об'єкта виконувати задані функції протягом встановленого наробітку чи терміну експлуатації. Необхідний рівень надійності закладається в конструкцію при її проектуванні, реалізується при виготовленні (зведенні будівлі чи споруди) та підтримується в процесі експлуатації. Тому надійність є комплексним поняттям, яке інтегрує такі характеристики, як безвідмовність, довговічність, збережуваність, ремонтпридатність та інші властивості об'єкта. Для забезпечення надійного функціонування технічного об'єкта необхідно розробити вимоги до нього, засоби реалізації цих вимог (принципи проектування, методики розрахунків тощо), засоби контролю якості при створенні об'єкта, а також засоби діагностики його технічного стану та рівня надійності у процесі експлуатації. По відношенню до будівельних конструкцій, будівель і споруд ці завдання розв'язуються шляхом створення комплексу нормативних документів, до яких відносяться технічні умови на будівельну продукцію та на методи контролю її якості, а також норми проектування будівель, споруд і будівельних конструкцій.

Теорія надійності є узагальнюючою науковою дисципліною, яка вивчає закономірності зміни показників якості технічних систем і розробляє методи, що забезпечують достатню безвідмовність і довговічність їх роботи при мінімальних витратах. Зокрема, теорія надійності будівельних конструкцій вивчає методи оцінювання, регулювання та забезпечення необхідного рівня надійності конструкцій, будівель та споруд на всіх етапах їх життєвого циклу. При цьому враховується, що переважна більшість параметрів будівельних конструкцій, навантажень і впливів експлуатаційного середовища має випадковий характер. Це обумовлює необхідність імовірнісного підходу до аналізу показників надійності будівельних конструкцій з використанням імовірнісних моделей випадкових величин і випадкових процесів.

На сучасному етапі розвитку теорії надійності проектування конструкцій за заданим рівнем надійності та імовірнісні розрахунки з метою оцінювання імовірності відмови чи безвідмовної роботи конструкцій виконуються лише в наукових дослідженнях та при проектуванні унікальних об'єктів. В масовому будівництві імовірнісні методи теорії надійності зазвичай використовуються в якості засобу регулювання рівня надійності конструкцій при розробленні норм проектування, які встановлюють вихідні дані та способи розрахунків конструкцій усіх видів за методом граничних станів.

Навчальна дисципліна "Основи теорії надійності будівель і споруд" є однією з профільюючих дисциплін фахової підготовки інженерів-будівельників. Її метою є ознайомлення студентів з основними положеннями теорії надійності, засобами забезпечення надійності будівельних об'єктів, методами оцінювання показників надійності та довговічності будівельних конструкцій і виробів, вивчення практичних методів статистичного дослідження й нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен знати: основні поняття теорії надійності, вимоги до надійності будівельних об'єктів, засоби забезпечення їх надійності, компоненти та показники надійності, моделі відмов і методи оцінювання показників надійності будівельних конструкцій і виробів, імовірнісні моделі навантажень, методи статистичного дослідження й нормування навантажень на будівельні конструкції.

Теоретичну частину курсу рекомендується вивчати за даним навчальним посібником, підрозділи якого відповідають питанням навчальної програми курсу "Основи теорії надійності будівель і споруд". Усі питання викладені коротко, але досить повно для розуміння їх суті. У кінці кожного підрозділу наведені детальні посилання на літературні джерела, доступні в паперовому чи електронному вигляді. Вивчення вказаних у посиланнях норм проектування є обов'язковим; інші джерела рекомендується вивчати з метою поглиблення знань та отримання додаткової інформації.

Викладені в посібнику питання лекційного курсу конкретизуються на практичних заняттях та при виконанні індивідуальних розрахункових завдань, у процесі роботи над якими студенти набувають уміння виконувати статистичні дослідження технічних характеристик будівельних матеріалів і навантажень на будівельні конструкції, визначати параметри поширених імовірнісних моделей та розрахункові значення навантажень за наявними статистичними даними, оцінювати показники безвідмовності елементів несучих будівельних конструкцій з використанням простих імовірнісних моделей.

Розділ 1

ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Проблема надійності та її значення для сучасного будівництва

Поняття надійності часто вживається в техніці та в побуті, а тому на інтуїтивно-описовому рівні усім відоме й зрозуміле. Ми говоримо про надійну чи ненадійну техніку, надійну чи ненадійну людину, розуміючи під надійністю здатність до виконання певних функцій чи зобов'язань. Актуальність проблеми забезпечення надійності технічних об'єктів, у тому числі будівель, споруд та будівельних конструкцій є очевидною, адже нікому не потрібна ненадійна техніка, відмови якої будуть призводити до матеріальних збитків та соціальних втрат до людського життя включно.

На перший погляд здається, що надійність технічних об'єктів повинна бути якомога вищою; найкраще робити їх абсолютно безвідмовними. Однак досвід вказує на неможливість такого рішення. Наведемо лише два аргументи:

1. Навряд, чи можна назвати якийсь технічний пристрій, який нескінченно довго повною мірою виконує свої функції.
2. Не зважаючи на найвищий рівень кадрового, матеріально-технічного і фінансового забезпечення космічної галузі, нерідко трапляються невдалі запуски чи стиковки, а також відмови обладнання на борту.

Ці та інші подібні факти свідчать про неможливість забезпечення абсолютної надійності технічних об'єктів. Для виявлення причини цього розглянемо найпростіший приклад центрально розтягнутого стержня, необхідна площа поперечного перерізу якого визначається за формулою

$$A = N/R, \quad (1.1)$$

де N – зусилля в стержні; R – характеристика міцності.

Очевидно, що надійним буде стержень, площа перерізу якого не менша за (1.1). Переважна більшість навантажень на будівельні конструкції є випадковими величинами чи процесами, які не мають фізичного обмеження зверху (наприклад, атмосферні навантаження). Тому з певною (хоча й дуже малою) імовірністю зусилля N може приймати дуже великі значення. Характеристика міцності матеріалу R також є випадковою величиною, фізично обмеженою знизу нулем. Тоді в ряді випадків для забезпечення надійної роботи стержня потрібно, щоб його площа поперечного перерізу була дуже великою. Оскільки це практично неможливо, забезпечити абсолютно надійну роботу стержня при усіх можливих комбінаціях зусилля й міцності також неможливо; при будь-якому перерізі існуватиме певна імовірність відмови.

Аналогічні проблеми виникають і в інших галузях техніки. Випадкові властивості електронних пристроїв, умов їх експлуатації, напруги та сили струму також обумовлюють випадковий характер їх роботи й відмов. Отже, в межах матеріального світу нічого абсолютно надійного створити неможливо.

Реально можна лише встановлювати певний рівень надійності технічних об'єктів, регулюючи співвідношення між їх властивостями та впливами експлуатаційного середовища. Очевидно, що підвищити рівень надійності можна лише за рахунок збільшення вартості об'єкта (більші перерізи елементів, якісніші матеріали, резервування, контроль експлуатаційних впливів за допомогою додаткових пристроїв тощо). Залежність початкової вартості V_{Π} від рівня надійності зображена на рисунку 1.1 зростаючою кривою.

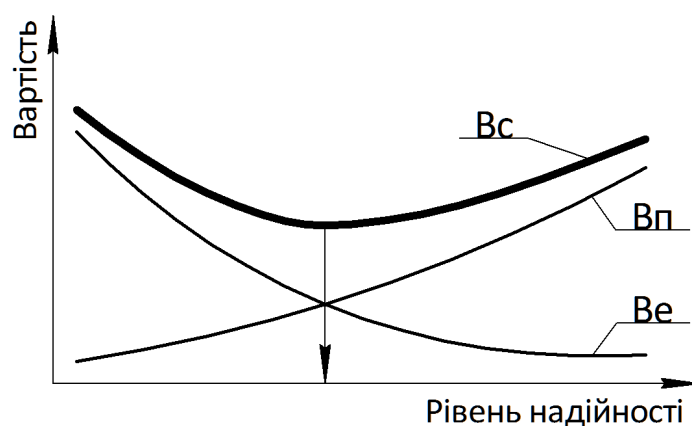


Рис. 1.1 Залежності витрат від рівня надійності об'єкта

З іншого боку, зростання рівня надійності зменшує експлуатаційні видатки V_E на технічне обслуговування й ремонти та втрати від імовірних відмов (відновлення об'єкта, збитки від простоїв, неекономічні втрати). Сума початкової вартості об'єкта V_{Π} та вартості його експлуатації, включаючи збитки від відмов V_E , звичайно утворює криву V_C , яка має мінімум. Цей мінімум відповідає оптимальному рівню надійності даного об'єкта в певних умовах експлуатації. Зміна окремих складових вартості відповідним чином змінює оптимальний рівень надійності. Задача пошуку оптимального рівня надійності математично вирішувалася лише з урахуванням фінансових збитків і витрат на даному рівні розвитку суспільства і техніки. Соціальні втрати практично неможливо виразити у вартісному еквіваленті, тому ця задача розв'язується в основному на підставі інженерного досвіду.

З розвитком рівня техніки проблема забезпечення надійності неухильно загострюється внаслідок:

- зростання вимог до якості функціонування об'єктів;
- зростання ступеню відповідальності об'єктів;
- зростання складності об'єктів і конструкцій;
- підвищення інтенсивності режимів експлуатації.

Огляд історії розвитку теорії надійності показує, що розуміння імовірнісної природи властивостей конструкцій та умов їх експлуатації вперше зародилося саме в галузі будівельних конструкцій. Перші спроби визначення та регулювання рівня надійності конструкцій зроблені близько 1930 року в роботах М. Майєра і Н.Ф. Хоціалова. Основні завдання та концептуальні підходи до імовірнісних розрахунків будівельних конструкцій сформульовані М.С. Стрілецьким, а математичні методи розрахункового визначення рівня їх надійності вперше розроблені О.Р. Ржаніциним та системно викладені в [4]. Значний розвиток дослідження надійності отримали в галузі електроніки, радіофізики та інших суміжних галузей, для яких вони відігравали вирішальну роль у забезпеченні працездатності відповідних технічних систем.

Подальші дослідження в галузі надійності будівельних конструкцій велися В.В. Болотіним [7] та його учнями. Ці дослідження виконувалися на базі імовірнісних моделей випадкових процесів, але в основному мали математико-теоретичний характер і далеко не повною мірою враховували реальні особливості роботи конструкцій та впливів експлуатаційного середовища.

Таким чином сформувалася нова наукова дисципліна – теорія надійності технічних систем, яка вивчає закономірності зміни показників якості технічних систем і розробляє методи, що забезпечують достатню безвідмовність і довговічність їх роботи з мінімальними витратами. Зокрема, теорія надійності будівельних конструкцій вивчає методи імовірнісного оцінювання, регулювання та забезпечення необхідного рівня надійності конструкцій, будівель та споруд на всіх етапах життєвого циклу з урахуванням випадкового характеру впливів експлуатаційного середовища, властивостей самих конструкцій та особливостей їх взаємодії.

До 80-тих років минулого століття практично орієнтовані дослідження в галузі надійності будівельних конструкцій переважно виконувалися на базі спрощеного математичного апарату випадкових величин, який не міг адекватно відобразити всі особливості поведінки конструкцій під дією випадкових впливів експлуатаційного середовища. Разом з тим, у цей час отримані важливі результати в галузі нормування навантажень на будівельні конструкції та порівняльного аналізу рівня їх безвідмовності. Подальший розвиток теорія надійності будівельних конструкцій отримала в працях українських вчених [3, 10, 11, 12] та інших, які базуються на використанні математичних моделей випадкових процесів [7], але разом з тим доведені до конкретних числових рішень. Такий підхід дозволив удосконалити норми проектування будівельних конструкцій та розробити нормативні документи України [1, 2].

На сучасному етапі розвитку теорії надійності імовірнісні розрахунки з метою оцінювання імовірності відмови чи безвідмовної роботи конструкцій виконуються лише в наукових дослідженнях та при проектуванні унікальних об'єктів. В масовому будівництві теорія надійності зазвичай використовується в якості засобу регулювання рівня надійності при розробленні норм проектування, які встановлюють вихідні дані та способи розрахунків конструкцій усіх видів.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – розділи 3, 4
- [4] – сторінки 4–10
- [13] – сторінки 8–14

1.2 Основні поняття, терміни та визначення теорії надійності

Визначення основних понять теорії надійності будівельних конструкцій наведені в ДБН В.1.2-14-2009 "Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ" [1]. Нижче ці поняття й терміни згруповані за смисловими ознаками.

Об'єкти – вироби, споруди, конструкції, машини, механізми, системи, а також їх підсистеми (складальні одиниці, деталі, компоненти або елементи). У поняття "об'єкти" можуть включатися інформація та її носії, а також людський фактор, якщо розглядається надійність системи "машина – людина".

Параметри – конструкційна міцність, несуча здатність, деформативність, фізичні властивості, показники точності функціонування, продуктивності, тощо, які характеризують роботу об'єкта і можуть змінюватися з часом.

Надійність будівельного об'єкта – властивість об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу.

Експлуатація – використання об'єкта за функціональним призначенням (з проведенням необхідних заходів щодо збереження стану конструкцій), коли він здатен виконувати задані функції, зберігаючи значення параметрів, встановлені вимогами технічної документації.

З поняттям експлуатації пов'язані терміни:

- нормальна експлуатація будівлі (споруди) – експлуатація об'єкта, здійснювана без обмежень відповідно до передбачених нормами або завданням на проектування технологічних чи природних умов;

- нормальний режим експлуатації – за якого об'єкт експлуатується в передбачених проектом кліматичних умовах із додержанням режиму виконання передбачених ремонтно-профілактичних робіт;
- встановлений термін експлуатації – календарна тривалість експлуатації об'єкта, при досягненні якої його подальше застосування за призначенням допускається лише після спеціального підтвердження роботоздатності;
- наробіток – обсяг виконаної об'єктом роботи (число циклів заморожування при аналізі морозостійкості матеріалу, кількість циклів навантаження при аналізі витривалості конструкції, кількість робочих циклів екскаватора чи вантажопідйомного крана, пробіг автомобіля тощо);
- нагляд – прийнята на об'єкті система спостереження, фіксації та оцінки технічного стану конструкцій та їх частин;
- ремонт – комплекс операцій із відновлення роботоздатності об'єкта і (або) збільшення його довговічності;
- ремонтпридатність – пристосованість об'єкта до підтримання і відновлення роботоздатного стану за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

У процесі експлуатації об'єкт взаємодіє з експлуатаційним середовищем, сприймаючи його **впливи та навантаження**:

- вплив – будь-яка причина, в результаті якої в конструкції змінюються внутрішні напруження, деформації або інші параметри стану;
- навантаження – вплив, під яким розуміють як безпосередньо силові впливи, так і впливи від зміщення опор, зміни температури, усадки та інших подібних явищ, що викликають реактивні сили.

Об'єкт може перебувати в різних **технічних станах**, змінюючи їх у процесі експлуатації:

- справний стан – стан об'єкта, за якого він виконує всі передбачені функції за умов здійснення ремонтно-профілактичних робіт;
- роботоздатний стан (роботоздатність) – технічний стан, за якого об'єкт виконує всі свої функції, зберігаючи при цьому допустимий рівень ризику;
- граничний стан – стан, за якого подальша експлуатація будівельного об'єкта недопустима, пов'язана з труднощами або недоцільна;
- позаграничний стан (стан відмови) – перевищення межі, встановленої нормами для граничного стану.

Відмова – подія, що полягає в переході через один із граничних станів (реалізація позаграничного стану). З поняттям відмови пов'язане також поняття безвідмовності, тобто здатності об'єкта безперервно зберігати роботоздатний стан протягом заданого терміну експлуатації.

До поняття **відмови** близькі також терміни:

- аварія – пошкодження, вихід із ладу, руйнування, що сталося з техногенних або природних причин;
- проектна аварія – можлива аварія, для якої проектом передбачені спеціальні заходи активного управління і захисту;
- катастрофа – великомасштабна аварія, яка спричинила численні людські жертви, значні матеріальні збитки або інші тяжкі наслідки;
- максимально можлива катастрофа – передбачена спеціальними нормами в умовах існування об'єкта природна або техногенна катастрофа, за появи якої головні несучі конструкції повинні забезпечити виконання функцій, пов'язаних із безпекою;
- збитки – матеріальні чи фінансові втрати внаслідок відмови;
- втрати – спричинені відмовою втрати нематеріального характеру (життя та здоров'я людей, культурні та духовні цінності тощо);
- ризик – кількісна характеристика можливих втрат, спричинених випадковими непередбаченими подіями, що викликають часткове або повне руйнування споруди.

Надійність є комплексною властивістю об'єкта, яка включає ряд взаємно пов'язаних компонентів, вказаних на рисунку 1.2.

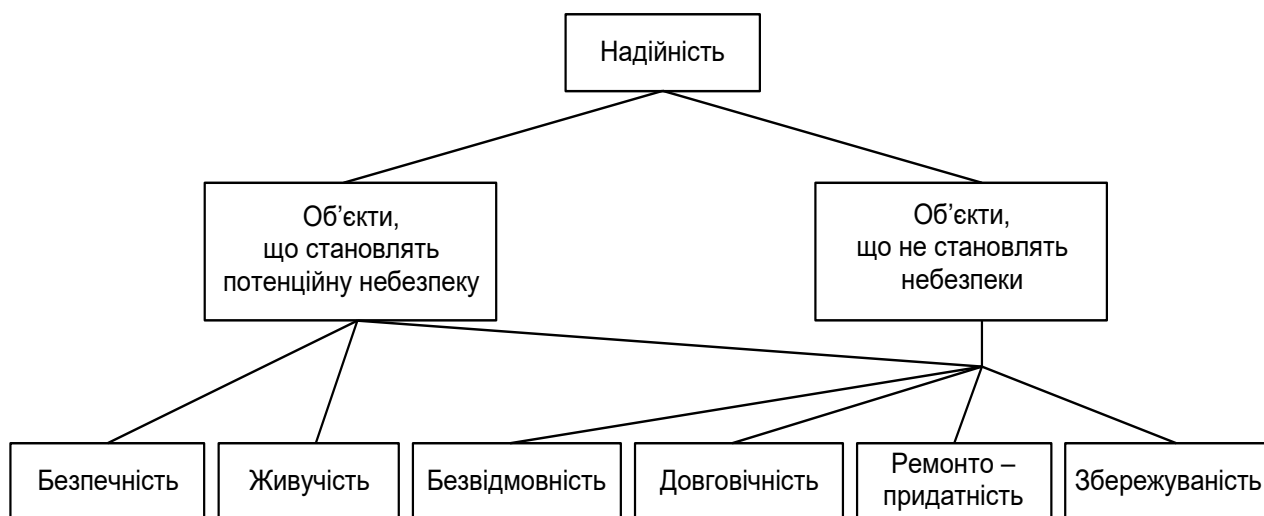


Рис. 1.2 Структура компонентів надійності

До складу загального поняття надійності входять такі компоненти:

- безвідмовність – здатність об'єкта безперервно зберігати роботоздатний стан протягом деякого часу експлуатації;
- довговічність – властивість об'єкта зберігати роботоздатний стан до настання граничного стану в умовах установленної системи технічного обслуговування та ремонту;

- безпечність – властивість об'єкта при експлуатації, а також у випадку порушення роботоздатності не створювати загрози для життя і здоров'я людей, а також загрози для довкілля;
- живучість – властивість об'єкта зберігати обмежену роботоздатність під впливами, що не передбачені умовами експлуатації, за наявності деяких пошкоджень, а також за відмови деяких компонентів об'єкта.
- ремонтпридатність – пристосованість до підтримання й відновлення роботоздатного стану за допомогою технічного обслуговування і ремонту;
- збережуваність – здатність зберігати у встановлених межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції під час та після зберігання й транспортування.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – розділи 3, 4

1.3 Вимоги та засоби забезпечення надійності технічних об'єктів

Необхідний рівень надійності будівельного об'єкта, конструкції та її елементів повинен забезпечуватися на усіх **етапах життєвого циклу**:

- на етапі вишукування й проектування – визначенням доцільних параметрів об'єкта, вибором проектних рішень, виконанням комплексу розрахунків і задоволенням конструктивних вимог з урахуванням умов використання;
- у процесі виготовлення, транспортування й зберігання – шляхом вибору технологічних рішень, реалізації вимог щодо якості матеріалів, точності розмірів, технологічних режимів, антикорозійного захисту, упакування;
- у процесі зведення та приймання об'єкта в експлуатацію – за рахунок забезпечення відповідності зведеного об'єкта до проектної документації шляхом дотримання технології зведення, оперативного контролю якості матеріалів і робіт, контролю при прийманні в експлуатацію;
- у процесі експлуатації – забезпеченням відповідності режиму експлуатації до проектного чи встановленого за даними обстежень технічного стану, виконанням технічних обстежень, регламентних робіт і поточних ремонтів;
- у процесі реконструкції та подальшого використання в нових умовах – шляхом встановлення вимог щодо зміни окремих характеристик об'єкта відповідно до нового режиму його використання, а також реалізації заходів, викладених у попередніх пунктах, з метою забезпечення нових вимог;
- у процесі ліквідації об'єкта – розробленням і дотриманням технології демонтажу та утилізації матеріалів і конструкцій з метою забезпечення безпечності для персоналу та навколишнього середовища.

Основною вимогою, яка визначає надійність будівельного об'єкта, є його відповідність призначенню й здатність зберігати протягом встановленого терміну експлуатації необхідні експлуатаційні якості, до яких належать:

- гарантія безпеки для здоров'я і життя людей, майна та довкілля;
- збереження цілісності об'єкта та його основних частин і виконання інших вимог, які гарантують можливість використання об'єкта за призначенням: вимоги до жорсткості будівельних конструкцій і основ, тепло- і звукоізоляційних властивостей огорожень, їх герметичності тощо;
- забезпечення можливості розвитку об'єкта та його пристосування до технічних, економічних або соціальних умов, що змінюються;
- створення необхідного рівня зручностей і комфорту, включаючи вимоги до кліматичного режиму в приміщеннях (повітрообмін, температура, вологість, рівень освітленості тощо), а також доступність для оглядів і ремонтів, можливість заміни і модернізації окремих елементів тощо;
- обмеження ступеня ризику шляхом виконання вимог до вогнестійкості, безвідмовності роботи захисних пристроїв, надійності систем і мереж життєзабезпечення, живучості будівельних конструкцій тощо.

Наведені вимоги до функціональних характеристик зазвичай ставляться до всієї споруди в цілому. Складові частини, які відіграють різні ролі у забезпеченні надійності споруди, мають різну відповідальність, але вимоги до них повинні встановлюватися і реалізовуватися сумісно (наприклад, вимога до температури повітря в приміщенні забезпечується шляхом узгодження параметрів систем опалення та вентиляції з теплоізоляційними властивостями огорожувальних конструкцій).

Будівельні конструкції й основи, як складові частини будівельного об'єкта, **повинні відповідати наступним вимогам:**

- сприймати без руйнувань і недопустимих деформацій впливи, що виникають під час їх зведення та встановленого терміну експлуатації;
- мати достатню роботоздатність в умовах нормальної експлуатації протягом усього встановленого терміну експлуатації, а саме: експлуатаційні параметри (переміщення, вібрації тощо) із заданою імовірністю не повинні виходити за встановлені межі, а довговічність повинна бути такою, щоб погіршення властивостей матеріалів і конструкцій внаслідок деградаційних процесів гниття, корозії, стирання та інших форм фізичного зношування не призводило до недопустимо високої імовірності відмови;
- мати достатню живучість по відношенню до локальних руйнувань і передбачених нормами аварійних впливів (пожеж, вибухів, наїздів транспортних засобів тощо), виключаючи прогресуючі руйнування, коли загальні пошкодження виявляються значно більшими ніж первісне збурення, що їх викликало.

Надійність, у тому числі довговічність і живучість, забезпечуються одночасним виконанням вимог, які висуваються до вибору матеріалів, конструктивних і об'ємно-планувальних рішень, до методів розрахунку, проектування та контролю якості робіт при виготовленні конструкцій та їх зведенні, а також дотриманням правил технічної експлуатації, нагляду і догляду за конструкціями. Для забезпечення встановленого рівня надійності **використовуються такі засоби:**

- урахування взаємодії з навколишнім середовищем в режимі нормальної експлуатації (впливи від роботи устаткування, навантаження від людей і вантажів, атмосферні впливи тощо);
- урахування небезпек, які можуть призвести до порушення роботоздатності конструкцій (недосконалість норм проектування; недоліки проектування, виготовлення, зведення або експлуатації внаслідок грубих помилок персоналу; істотні зміни технологічних навантажень і впливів внаслідок різких змін технологічного процесу; перевантаження при стихійних лихах, техногенних аваріях та інших виняткових подіях);
- виключення помилок осіб, які беруть участь у процесах будівництва та експлуатації, шляхом визначення і фіксації у нормативній, проектній та експлуатаційній документації їх функцій та міри відповідальності, підбору персоналу відповідної кваліфікації з використанням процедур контролю і ліцензування прав на ведення різних видів професійної діяльності, регламентації робочих процедур та способів документування контролю за результатами роботи персоналу;
- підтримання робочого стану конструкцій протягом усього встановленого терміну експлуатації шляхом проведення оглядів і обстежень (у тому числі з використанням автоматизованих систем контролю), ремонтів, або повної заміни конструкцій.

Попередження або зниження впливу небезпек здійснюється шляхом:

- захисту від небезпеки – виключення впливу джерела небезпеки шляхом використання спеціальних антиперевантажувальних пристроїв, систем попередження і оповіщення тощо;
- урахування небезпек – проектування конструкцій такими, щоб при виникненні небезпеки з встановленою імовірністю була виключена можливість руйнування будь-якого відповідального елемента;
- послаблення наслідків небезпек – проектування об'єкта таким, щоб конструкції, відмова яких може бути безпосередньою причиною аварійної ситуації, при виникненні небезпеки зберігали роботоздатність протягом часу, достатнього для вжиття термінових заходів (наприклад, для евакуації людей або для зміни режиму роботи устаткування).

З цією метою створюються бар'єри, які послідовно включаються в роботу, функціонують незалежно один від одного та виконують наступні функції:

- перешкоджають виникненню перевантажень, збоїв і аварійних ситуацій;
- забезпечують сприйняття аварійних перевантажень без руйнувань та функціонування основної частини об'єкта (можливо з погіршенням параметрів якості або після ремонту);
- запобігають лавиноподібному розвитку руйнувань і відмов, а також локалізують наслідки аварії, що вже сталася.

Ці захисні бар'єри створюються за рахунок:

- обґрунтованого вибору майданчика для розміщення об'єкта, встановлення санітарно-захисної зони, забезпечення протипожежних розривів тощо;
- розроблення проекту на підставі уточнених даних про можливість виникнення і характер проявлення катастрофічних впливів;
- використання спеціальних систем безпеки;
- забезпечення потрібної якості матеріалів, конструкцій, виробів, будівельних робіт, організації вхідного, поопераційного і приймального контролю;
- експлуатації об'єкта у відповідності з експлуатаційною документацією, яка спеціально розробляється у складі проекту;
- підтримання у належному стані важливих для безпеки об'єкта елементів, пристроїв і систем шляхом проведення необхідних профілактичних робіт;
- своєчасного діагностування й оцінювання технічного стану, усунення виявлених дефектів і пошкоджень;
- заходів із запобігання можливим причинам аварій, та локалізації шкідливих наслідків при виникненні аварій;
- підготовки і реалізації планів аварійних заходів на об'єкті і за його межами, в тому числі і за участю населення;
- забезпечення необхідного рівня підготовки персоналу.

У проекті та в складі експлуатаційної документації, що передається замовнику, повинен бути передбачений спеціальний розділ, у якому розглядаються заходи безпеки.

При проектуванні враховуються **параметри проектних аварій**, для яких проектом передбачено спеціальні засоби активного управління і захисту (пожежне навантаження, сила вибуху, рівень затоплення при повені тощо) та максимально можливих природних і техногенних катастроф, які можуть бути викликані наступними вихідними подіями:

- техногенними катастрофами (аваріями транспортних засобів, вибухами, пожежами, витіканням розплавленого металу тощо), які відбуваються в межах об'єкта або в його найближчому оточенні;

- катастрофічними перевищеннями інтенсивності природних впливів рівня, встановленого чинними нормами для району будівництва;
- грубими помилками персоналу на стадіях проектування, зведення або експлуатації об'єкта;
- різкою невідповідністю характеристик будівельних матеріалів і виробів, елементів устаткування вимогам нормативно-технічної документації.

Рекомендується також розробляти й аналізувати сценарії розвитку аварій з урахуванням впливу вторинних факторів (вибухів, пожеж, руйнувань захисних перешкод, ударів від падіння елементів), причиною яких була первісна аварія.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – розділ 4

[4] – сторінки 56–60

1.4 Метод граничних станів як засіб регулювання надійності будівельних конструкцій

Історично першим способом встановлення габаритів і поперечних перерізів будівельних конструкцій був емпіричний вибір та копіювання вдалих споруд. Першим методом розрахунку, який зароджувався й використовувався в 16–17 столітті, був **метод руйнівних навантажень**, суть якого полягала в порівнянні діючого навантаження з експериментально встановленою несучою здатністю конструкції. У 17–18 століттях створено основи будівельної механіки та опору матеріалів, що дозволило розробити **метод допустимих напружень**. Напруження від діючих навантажень, обчислені з урахуванням схеми та розмірів конструкції, порівнювалися з допустимими напруженнями, які визначалися за результатами випробувань матеріалу і враховували певний коефіцієнт запасу міцності. Основним недоліком цього методу був єдиний коефіцієнт запасу міцності, що не дозволяло диференціювати конструкції за відповідальністю, рівнем надійності та умовами роботи, а також достатньою мірою враховувати особливості діючих навантажень.

Наступним етапом розвитку методів розрахунку несучих будівельних конструкцій став **метод граничних станів**, який уперше в світі був офіційно введений в СРСР з 1955 року в НИТУ 121-55 "Нормы и технические условия проектирования стальных конструкций". Метод граничних станів базується на порівнянні зусиль від дії розрахункових (найбільших імовірних) значень навантаження з розрахунковою (найменшою імовірною) несучою здатністю

конструкції. Якщо сумарні зусилля не S перевищують розрахункової несучої здатності R , конструкція вважається достатньо надійною:

$$S \leq R \quad (1.2)$$

Центральним поняттям методу є граничний стан, умова недопущення якого описується нерівністю (1.2). Перехід через граничний стан відповідає відмові конструкції, але самі граничні стани вважаються допустимими. Тому всі розрахункові вимоги норм формулюють для граничних станів, які можуть бути віднесені до конструкції в цілому, до її окремих елементів, з'єднань або поперечних перерізів. При цьому особливості навантажень, властивостей матеріалів, роботи конструкцій та їх взаємодії з експлуатаційним середовищем враховуються системою коефіцієнтів надійності, кожен з яких характеризує певний розрахунковий чинник. Кожній розрахунковій ситуації відповідає своя комбінація частинних коефіцієнтів надійності, що й дозволяє диференціювати коефіцієнт запасу за видами конструкцій та умовами їх експлуатації.

В даний час метод граничних станів, або метод частинних коефіцієнтів надійності, або напівімовірнісний метод є основним методом розрахунку несучих будівельних конструкцій.

Основні поняття методу граничних станів:

Граничний стан – стан, за якого подальша експлуатація будівельного об'єкта недопустима, пов'язана з труднощами або недоцільна.

Позаграничний стан – перевищення межі, встановленої нормами для граничного стану (відмова).

Відмова – подія, що полягає в переході через один із граничних станів (реалізація позаграничного стану).

Відмова-зрив – відмова, поява якої одразу ж викликає збитки (втрати).

Відмова-перешкода – відмова, після появи якої починається поступове накопичення збитків (втрат).

Втрати – спричинені відмовою втрати нематеріального характеру (життя та здоров'я людей, культурні та духовні цінності тощо).

Збитки – матеріальні чи фінансові втрати внаслідок відмови.

Відповідно до виду відмов розрізняють дві **групи граничних станів**:

Перша група – граничні стани, перехід через які призводить до повної непридатності будівельного об'єкта (конструкції, елемента) до експлуатації, що пов'язано з порушенням вимог збереження цілісності чи можливості існування об'єкта або з недотриманням вимог безпеки для людей і довкілля. Вихід за межі граничного стану першої групи класифікується як **відмова-зрив**.

Друга група – граничні стани, які ускладнюють нормальну експлуатацію будівельного об'єкта (конструкції, елемента) або зменшують його довговічність порівняно зі встановленим терміном експлуатації. Це може бути пов'язано з порушенням вимог щодо використання об'єкта без обмежень, рівня комфорту, зручностей персоналу, вимог до зовнішнього вигляду конструкцій. Перехід за граничний стан другої групи класифікується як **відмова-перешкода**.

Вимоги норм проектування повинні враховувати умови, в яких реалізується граничний стан. Для цього встановлюють **розрахункові ситуації**, які описують характерні комплекси умов, що враховуються при розрахунку, та розрахункові вимоги до конструкції. Розрахункова ситуація характеризується розрахунковою схемою конструкції, видами навантажень і впливів, переліком граничних станів та значенням допустимої імовірності відмови, заданої через коефіцієнти умов роботи і коефіцієнти надійності. При встановленні допустимої імовірності відмови враховують, що в різних розрахункових ситуаціях ті ж самі граничні стани можуть призводити до різних наслідків, соціальних втрат та економічних збитків.

Нормами [1] встановлено три **типи розрахункових ситуацій**:

- усталені, для яких характерна тривалість реалізації того ж порядку, що й встановлений термін експлуатації будівельного об'єкта (період експлуатації між двома капітальними ремонтами або змінами технологічного процесу);
- перехідні, для яких характерна тривалість реалізації, невелика порівняно із встановленим терміном експлуатації (період зведення об'єкта, капітального ремонту, реконструкції);
- аварійні, для яких характерна мала імовірність виникнення й невелика тривалість реалізації, але які можуть призвести до значних наслідків від можливих відмов (вибухи, пожежі, аварії обладнання, зіткнення транспортних засобів, відмови елементів конструкцій).

При розрахунку слід розглядати всі можливі для даного об'єкта розрахункові ситуації, граничні стани та параметри, які їм відповідають. Умови забезпечення безвідмовності задаються у вигляді **граничних нерівностей**, які підлягають перевірці та враховують такі параметри:

- впливи експлуатаційного середовища;
- властивості матеріалів і ґрунтів;
- розміри, положення, умови закріплення конструкцій та їх елементів.

Умови безвідмовності задаються граничними нерівностями, які виражають основну ідею методу граничних станів (4.1). Загальний вигляд граничної нерівності у формі резерву несучої здатності, наведено в [1]:

$$g(G_d, f_d, a_d, C, \gamma_n, \gamma_d, T_{ef}) \geq 0, \quad (1.3)$$

де $g(\bullet)$ – така функція параметрів системи, за якої $g(\bullet) < 0$ означає досягнення позаграничного стану;

G_d, f_d, a_d – розрахункові значення навантажень, характеристик міцності матеріалів або опору ґрунтів та геометричних характеристик конструкції відповідно;

γ_n – коефіцієнт відповідальності, який враховує значущість конструкції та об'єкта в цілому, можливі наслідки відмови та враховується як множник до розрахункового значення навантаження;

γ_d – коефіцієнт надійності моделі, який враховує невизначеність розрахункової схеми та інші аналогічні обставини;

C – обмеження на параметр, що контролюється (наприклад, допустимий прогин чи граничне розкриття тріщини).

Фактор часу враховується явно, або шляхом вибору розрахункових значень G_d, f_d та інших параметрів залежно від встановленого терміну експлуатації об'єкта T_{ef} . Загальна форма граничної нерівності (1.3) конкретизується у нормах проектування конструкцій певного виду (металевих, залізобетонних, дерев'яних тощо) з урахуванням розрахункової ситуації, граничного стану, матеріалу та характеру роботи конструкції, а також особливостей навантажень і впливів та їх взаємодії з конструкцією.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – розділи 3, 6

[13] – сторінки 27–34

1.5 Граничні нерівності та розрахункові параметри методу граничних станів

Згідно з основними положеннями методу граничних станів [1], розрахунки несучих будівельних конструкцій виконуються шляхом аналізу граничних станів першої та другої групи.

Перша група містить граничні стани, пов'язані з порушенням вимог збереження цілісності чи можливості існування об'єкта або з недотриманням вимог безпеки для людей і довкілля, перехід через які призводить до повної непридатності будівельного об'єкта (конструкції, елемента) до експлуатації.

Позаграничними станами можуть бути такі **відмови-зриви**:

- руйнування будь-якого характеру (в'язке, крихке, від втомлюваності);
- втрата стійкості форми або втрата стійкості положення;
- перехід у змінну систему;
- якісна зміна конфігурації;

- інші явища, за яких виникає потреба у припиненні експлуатації (наприклад, виникнення перфорації стінки ємкості з токсичними речовинами або надмірні переміщення основи при просадках чи спучуванні ґрунтів).

Для граничних станів першої групи умова безвідмовності найчастіше визначається через дві функції: S – навантажувальний ефект (зусилля в елементі, напруження в перерізі); R – несуча здатність елемента чи поперечного перерізу, розрахунковий опір матеріалу. Тоді гранична нерівність для граничного стану першої групи записується у вигляді

$$\gamma_n S(G_d, a_d, \gamma_{sd}, T_{ef}) \leq R(f_d, a_d, \gamma_{rd}, T_{ef}), \quad (1.4)$$

або конкретніше
$$\gamma_n \psi \sum_i [\alpha_i \gamma_{fmi}(T_{ef}) G_{0i}] \leq \gamma_c A R_0 / \gamma_m. \quad (1.5)$$

Друга група містить граничні стани, перехід за які ускладнює нормальну експлуатацію будівельного об'єкта або зменшують його довговічність порівняно зі встановленим терміном експлуатації. Вони можуть бути пов'язані з порушенням вимог щодо використання об'єкта без обмежень, порушенням вимог щодо рівня комфорту, зручностей персоналу, вимог до зовнішнього вигляду конструкцій, або з недотриманням вимог щодо можливості розвитку і модернізації об'єкта з точки зору його призначення. **Позаграничними станами є відмови-перешкоди** такого виду:

- надмірні переміщення або повороти деяких точок конструкції;
- недопустимі коливання (надмірні значення амплітуди, частоти, швидкості, прискорення);
- утворення та розкриття тріщин, досягнення ними гранично-допустимих значень розкриття чи довжини;
- втрата стійкості форми у вигляді локального деформування;
- пошкодження від корозії чи інших видів фізичного зношення, які призводять до необхідності обмеження експлуатації внаслідок зменшення строку служби.

Граничні стани другої групи зазвичай перевіряють за нерівностями виду

$$S(G_d, f_d, a_d, \gamma_n, \gamma_{sd}, T_{ef}) \leq C / \gamma_{rd}, \quad (1.6)$$

або конкретніше
$$\gamma_n \psi \sum_i [\Delta_i \gamma_{fei}(\eta) G_{0i}] \leq \Delta_{lim} / \gamma_{rd}. \quad (1.7)$$

У граничні нерівності (1.4) – (1.7) входять такі **розрахункові параметри**: G_d, f_d, a_d – розрахункові значення навантажень, характеристик міцності матеріалів або опору ґрунтів та геометричних характеристик конструкції відповідно;

- γ_{sd} і γ_{rd} – коефіцієнти надійності моделі, який враховують невизначеність розрахункової моделі щодо навантажувальних ефектів та несучої здатності конструкції чи елемента;
- γ_{fmi} і γ_{fei} – коефіцієнти надійності за граничним та експлуатаційним розрахунковим значенням i -того навантаження за ДБН В.1.2-2:2006 [2];
- α_i і Δ_i – коефіцієнти впливу, які забезпечують перехід від i -того навантаження до навантажувального ефекту в конструкції (зусилля, прогин тощо);
- R_0 і γ_m – характеристичний опір матеріалу і коефіцієнт надійності за матеріалом з норм проектування конструкцій певного виду;
- T_{ef} – встановлений термін експлуатації конструкції;
- S – навантажувальний ефект (зусилля в елементі, напруження в перерізі, переміщення характерної точки конструкції тощо) від дії розрахункових (максимально можливих) значень зовнішніх навантажень;
- γ_n – коефіцієнт відповідальності (коефіцієнт наслідків), який враховує значимість конструкції та об'єкта в цілому та можливі наслідки відмови, визначається за ДБН В.1.2-14-2009 [1] залежно від класу відповідальності конструкції та розрахункової ситуації;
- ψ – коефіцієнт сполучення зусиль, який враховує малу імовірність одночасної реалізації розрахункових (максимальних) значень декількох навантажень і визначається за ДБН В.1.2-2:2006 "Навантаження і впливи" [2];
- R_{0i} – характеристичне значення i -того навантаження за ДБН В.1.2-2:2006 [2];
- R – розрахункова (мінімально можлива, гарантована з певною імовірністю) несуча здатність елемента конструкції;
- A – геометрична характеристика перерізу, що відповідає виду деформації елемента (площа, момент опору тощо);
- γ_c – коефіцієнт умов роботи конструкції чи елемента, визначений за нормами проектування конструкцій певного виду;
- C – обмеження на параметр, що контролюється за граничним станом другої групи (допустимий прогин чи переміщення за ДСТУ Б В.1.2-3:2006 "Прогини і переміщення. Вимоги проектування", граничне розкриття тріщини в залізобетонних конструкціях тощо);
- Δ_{lim} – гранично допустиме переміщення характерної точки конструкції (прогин, амплітуда коливань тощо).

Вирази (1.4) – (1.7) відображають узагальнену форму запису граничних нерівностей, яка конкретизується в нормах проектування конструкцій певного виду з урахуванням розрахункової ситуації, виду граничного стану, матеріалу та характеру роботи конструкції, а також особливостей навантажень і впливів та їх взаємодії з конструкцією. Наприклад, граничні нерівності для перевірки

сталевому стержню на центральний розтяг і стиск в ДБН В.2.6-163:2010 "Сталеві конструкції" записані у вигляді:

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1; \quad \frac{N}{\phi A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1.8)$$

де N – поздовжня сила в стержні;

A_n – площа нетто поперечного перерізу стержня;

R_y – розрахунковий опір сталі за межею текучості;

γ_c – коефіцієнт умов роботи;

ϕ – коефіцієнт стійкості при центральному стиску.

Аналогічним чином в нормах проектування сталевих, залізобетонних, дерев'яних та інших конструкцій конкретизуються граничні нерівності для розрахунку різних елементів та з'єднань на різні види деформацій.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – розділи 6, 7, додаток Б

1.6 Імовірнісна природа та принципи нормування розрахункових параметрів методу граничних станів

Для виконання розрахунків за методом граничних станів нормами проектування встановлюються значення усіх розрахункових параметрів, які входять до граничних нерівностей. Загальні розрахункові параметри (термін експлуатації, клас і коефіцієнт відповідальності) встановлюються за вказівками ДБН В.1.2-14-2009 [1]. Розрахункові параметри, які задають навантаження і впливи на конструкції, встановлені в ДБН В.1.2-2:2006 [2], а розрахункові параметри, які описують несучу здатність конструкцій та особливості їх роботи під навантаженням, встановлюються в нормах проектування залізобетонних, сталевих, дерев'яних та інших конструкцій.

Усі параметри, що враховуються в розрахунках будівельних конструкцій, є випадковими величинами чи процесами. Тому розрахункові значення цих параметрів встановлюють імовірнісними методами, виходячи з допустимої імовірності відмови конструкцій, що проектуються. Принципову схему нормування розрахункових параметрів розглянемо на найпростішому прикладі роботи центрально розтягнутого стержня, встановивши $\gamma_c=1$ і записавши граничну нерівність для його розрахунку у вигляді

$$N \leq A \times R. \quad (1.9)$$

При відомих розрахункових значеннях поздовжнього зусилля N та розрахункового опору матеріалу R виконання граничної нерівності (1.9)

забезпечується за рахунок такого вибору площі поперечного перерізу A , при якій (1.9) виконується точно. Розрахункове значення поздовжньої сили обчислюється через розрахункове (найбільше імовірне) значення навантаження, імовірність перевищення якого є допустимою. В якості розрахункового опору матеріалу встановлюється мінімальне значення характеристики міцності з допустимою імовірністю його зниження. Зменшення допустимих імовірностей виходу випадкових величин навантаження та міцності за межі розрахункових значень призведе до зростання N та зменшення R . Тоді для виконання граничної нерівності (1.9) доведеться збільшити площу поперечного перерізу A , що зробить конструкцію більш надійною. Отже, змінюючи допустимі імовірності виходу параметрів методу граничних станів за встановлені нормами розрахункові межі, можна змінювати розрахункові значення цих параметрів (зусилля й несучої здатності конструкції), тим самим регулюючи рівень надійності конструкцій.

Якщо розрахункові параметри є випадковими величинами, їх розрахункові значення встановлюють за формулами (2.30) – (2.32) чи аналогічними формулами для законів розподілу інших видів. Розрахункові значення змінних навантажень встановлюються з використанням імовірнісних моделей випадкових процесів, які дозволяють визначати періодичність та тривалість перевищень випадковим процесом навантаження відомих розрахункових значень, а також встановлювати розрахункові значення за заданою частотою чи тривалістю їх перевищення.

Властивості матеріалів і ґрунтів, зокрема характеристики міцності та деформативності, встановлюються на підставі результатів спеціальних випробувань і накопиченого досвіду шляхом статистичної обробки даних, одержаних випробуваннями стандартних зразків, і приводяться до реальних матеріалів у реальних конструкціях. Основним розрахунковим параметром є розрахунковий опір матеріалу, рівний найменшому імовірному значенню характеристики міцності з заданою забезпеченістю (імовірністю того, що фактична міцність буде більшою за розрахункове значення). В методі граничних станів розрахунковий опір матеріалу визначається за формулою

$$R = R_0 / \gamma_m, \quad (1.10)$$

де R_0 – характеристичний опір, який встановлюється рівним бракувальному мінімуму параметра міцності із забезпеченістю близько 0,95;

$\gamma_m > 1$ – коефіцієнт надійності за матеріалом, який встановлюється таким, щоб забезпеченість розрахункового опору (1.10) була в межах від 0,995 до 0,999 згідно з вимогами ДБН [1].

Характеристичні та розрахункові опори матеріалів встановлюються нормами проектування сталевих, залізобетонних і дерев'яних конструкцій. Так, наприклад, в ДБН В.2.6-163:2010 "Сталеві конструкції" характеристичні та розрахункові опори конструкційних сталей встановлені за межею текучості та за межею міцності сталі. При $1,025 \leq \gamma_m \leq 1,10$ забезпеченість розрахункового опору приблизно дорівнює 0,998 – 0,999, тобто лише один чи два зразки з тисячі можуть мати міцність, меншу за розрахунковий опір.

Геометричні характеристики (форма й положення конструкцій та їх елементів) встановлюються за номінальними значеннями з урахуванням допусків на виготовлення та монтаж виробів і конструкцій. Як правило, їх мінливість мала порівняно з мінливістю навантажень та фізико-механічних властивостей матеріалів, що дозволяє вважати їх детермінованими величинами та приймати рівними номінальним значенням за стандартами чи кресленнями.

Навантаження і впливи встановлюються за паспортними даними на вироби та обладнання, а також за результатами статистичного аналізу даних обстежень, метеорологічних та інших спостережень. Розрахунковим вважають найбільше імовірне значення випадкового навантаження з заданою імовірністю або періодом перевищення. Для кожного з основних навантажень і впливів нормами [2] встановлено експлуатаційне розрахункове значення, що відповідає умовам нормальної експлуатації, та граничне, що відповідає екстремальним умовам. При необхідності встановлюють також циклічне та квазіпостійне розрахункові значення. Для аварійних навантажень встановлюється лише граничне розрахункове значення. В методі граничних станів [1, 2] розрахункові значення навантажень обчислюють за формулами виду:

$$G = \gamma_f G_0 C, \quad (1.11)$$

де G_0 – характеристичне значення навантаження (для постійних навантажень приймається рівним середньому, а для змінних – найбільшому значенню, яке може перевищуватися 1 раз на 50 років);

γ_f – коефіцієнт надійності за навантаженням, залежний від виду розрахункового значення (граничне, експлуатаційне, циклічне чи квазіпостійне), встановленого терміну експлуатації конструкції чи інших факторів;

C – коефіцієнт чи добуток коефіцієнтів, які враховують особливості взаємодії конструкції з навантаженням (наприклад, висоту розміщення об'єкта над рівнем моря, характер розподілу снігу по поверхні покрівлі, розподіл вітрового тиску по будівлі, динамічні ефекти тощо).

Усі складові формули (1.11) для кожного виду навантажень і впливів, що можуть діяти на будівельні конструкції, встановлені в ДБН В.1.2-2:2006 "Навантаження і впливи" [2].

Коефіцієнт відповідальності γ_n регулює рівень надійності конструкцій (допустимої імовірності відмови) залежно від можливих наслідків відмови цієї конструкції. Конкретне значення γ_n встановлюється за ДБН В.1.2-14-2009 [1] залежно від класу відповідальності будівлі чи споруди, розрахункової ситуації та граничного стану, що розглядається. Значення γ_n , наведені в [1], встановлені відповідно до допустимої імовірності відмови конструкцій різного класу наслідків та категорії відповідальності в різних розрахункових ситуаціях.

Коефіцієнти моделі γ_{sd} і γ_{rd} враховують невизначеність розрахункової моделі, яка може бути оцінена в результаті натурних випробувань або шляхом порівняння результатів розрахунку наближеної та більш точної моделі. Вони відображають фактори, які з метою спрощення розрахунку не враховуються прямим шляхом, або взагалі не розглядаються розрахунковою моделлю. Наприклад, при перевірці стійкості центрально стиснутих стержнів сталевих ферм з парних кутників, гнучкість яких перевищує 60, враховується коефіцієнт умов роботи $\gamma_c=0,8$. Він враховує можливість виникнення погинів у процесі виготовлення, монтажу та експлуатації, наявності яких викликає позацентровий стиск і тим самим зменшує несучу здатність стержня. Значення $\gamma_c=0,8$ встановлене за результатами натурних обстежень кроквяних ферм промислових будівель з вимірюванням наявних погинів та порівняння несучої здатності центрально і позацентрово стиснутих стержнів.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – підрозділ 6.5, розділ 7

[4] – сторінки 19–27

1.7 Нормування характеристик міцності будівельних матеріалів

Залежно від виду конструкції та мети розрахунку, при аналізі надійності використовуються різні технічні характеристики будівельних матеріалів: модуль пружності, границя міцності при різних видах деформацій, границя текучості, середня густина, коефіцієнт теплопровідності тощо. На значення цих характеристик впливають безліч технологічних та експлуатаційних факторів, а тому вони мають випадковий характер. З практики відомо, що випробування зразків навіть дуже однорідного матеріалу (метал з однієї плавки, бетон з одного замісу) дають різні результати, обумовлені природним статистичним розкидом властивостей і технічних характеристик.

У багатьох випадках технічні характеристики матеріалів практично не змінюються в часі, що дозволяє представити їх у вигляді випадкових величин. При необхідності урахування змін характеристик матеріалів у часі їх слід

представляти у вигляді нестационарних випадкових процесів, але в певний момент часу ці характеристики можуть бути описані як випадкові величини.

Числові характеристики й закони розподілу випадкових величин технічних характеристик будівельних матеріалів встановлюються шляхом статистичної обробки вибірок, сформованих за результатами відповідних випробувань. Досвід показує, що переважна більшість технічних характеристик будівельних матеріалів, у тому числі показники міцності, межа текучості, середня густина, коефіцієнт теплопровідності можуть бути описані випадковою величиною з нормальним законом розподілу з густиною:

$$f(x) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-M)^2}{2 S^2} \right]. \quad (1.12)$$

де M і S – середнє значення та стандарт, отримані в результаті статистичної обробки вибірки значень відповідного показника.

Виключення складають показники опору стираності, які можуть бути розподілені за логарифмічно нормальним законом, показники витривалості при дії циклічних навантажень, зазвичай розподілені за законом Вейбулла, а також деякі інші технічні характеристики.

В інженерних розрахунках за методом граничних станів виникає потреба встановлення розрахункових (найменших чи найбільших імовірних) значень технічних характеристик, що відповідають певній імовірності виходу за їх межі. При нормальному розподілі граничне значення визначається за однією з формул (2.32), у яких знак "плюс" чи "мінус" обирається залежно від досліджуваної властивості матеріалу. Для характеристик міцності обирають знак мінус, що в результаті дає найменше імовірне значення. Для середньої густини чи коефіцієнта теплопровідності матеріалу слід обрати знак плюс, визначивши таким чином їх найбільші імовірні значення.

Для показників міцності матеріалів встановлюють характеристичне значення, яке використовують у якості контрольної межі (наприклад, клас міцності бетону чи бракувальний мінімум межі текучості сталі):

$$R_n = M - t \times S, \quad (1.13)$$

де M і S – середнє значення та стандарт за результатами статистичної обробки вибірки даних;

$t=1,64$ – квантиль нормованого нормального розподілу з таблиць [5, 7], що відповідає забезпеченості характеристичного опору $P=0,95$, яка традиційно прийнята й закріплена нормами [1] для нормування опорів будівельних матеріалів.

При наявності вибірки даних досить великого обсягу (сотні значень) розрахунковий опір матеріалу також визначають за формулою, (1.13) але для $t=2,58-3,09$, що відповідає забезпеченості 0,995– 0,999. В середовищі Excel обчислення за формулою (1.13) реалізуються функцією *НОРМОБР*(F, M, S).

При обмеженому обсязі випробувань доцільно скористатися формулою, яка заснована на понятті толерантного інтервалу і враховує також імовірні похибки визначення середнього значення й стандарту:

$$R = M - \alpha \times S, \quad (1.14)$$

де α – толерантна межа, що враховує необхідну забезпеченість розрахункового опору та обсяг вибірки показника міцності. Значення α приймають за таблицею, запозиченою з ДБН В.1.2-14-2009 [1]:

$N=$	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50
$\alpha=$	4,21	3,71	3,40	3,19	3,03	2,91	2,57	2,40	2,29	2,22	2,12	2,06

Детальні вказівки щодо порядку відбору зразків, методів їх статистичної обробки та визначення розрахункового опору сталі, аналогічні описаним вище, наведені також в ДБН 362-93 "Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації" [6].

В методі граничних станів встановлено зв'язок між характеристичним і розрахунковим опором матеріалу у вигляді формули (1.10). Коефіцієнт надійності за матеріалом γ_m , який входить до (1.10), встановлюють у нормах проектування конструкцій як відношення значень характеристичного та розрахункового опорів, обчислених за результатами статистичної обробки вибірок показників міцності великого обсягу.

Необхідність встановлення в нормах двох характеристик міцності (характеристичного R_0 та розрахункового опору R) пояснюється вимогами контролю якості матеріалів. Дуже висока забезпеченість розрахункового опору (від 0,995 до 0,999) не дозволяє виявити зразки з настільки низькою міцністю при контрольних випробуваннях. Для цього треба було б випробувати тисячі зразків з кожної партії матеріалу, що неможливо в умовах реального виробництва. Характеристичний опір R_0 має забезпеченість 0,95 (кожний двадцятий зразок має міцність меншу, ніж R_0). Це дозволяє у процесі контрольних випробувань виявляти зразки із заниженою міцністю і таким чином використовувати значення характеристичного опору в якості бракувального мінімуму показника міцності матеріалу.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – підрозділи 7.4, 7.5

[5] – практичне заняття № 3

1.8 Приклад визначення розрахункового опору сталі за результатами випробувань зразків

Вихідні даними є значення межі текучості, отримані за результатами випробувань 20-ти зразків сталі:

330	362	365	328	374	263	332	377	332	366
299	340	273	282	358	337	317	427	336	422

Необхідно виконати статистичну обробку наявної вибірки і встановити величини характеристичного та розрахункового опору випробуваної сталі. Розрахунки виконуються в послідовності, описаній в підрозділі 2.5:

1. Статистична обробка з використанням вбудованих функцій Excel за методикою, описаною в підрозділі 2.6, дала такі значення числових характеристик вибірки границі текучості сталі: обсяг вибірки $N=20$, розмах ($X_{\min}=263$ МПа та $X_{\max}=427$ МПа), середнє значення $M=341$ МПа, стандарт $S=43,1$ МПа, коефіцієнт варіації $V=0,126$.
2. Для побудови гістограми розподілу обрано 5 інтервалів довжиною 40 МПа кожен в межах від 240 МПа до 440 МПа. В середовищі Excel з використанням функції ЧАСТОТА(...) визначені кількості даних, що потрапили до кожного з інтервалів, імовірності попадання даних до кожного інтервалу (2.), а також дослідні значення густини імовірності (2.), за якими збудована гістограма розподілу, наведена на рисунку 1.3.
3. Для кожної з меж обраних інтервалів за функцією Excel НОРМРАСП() обчислені відповідні значення густини нормального розподілу, за якими на гістограму з рисунка 1.3 нанесена апроксимуюча крива густини нормального розподілу.

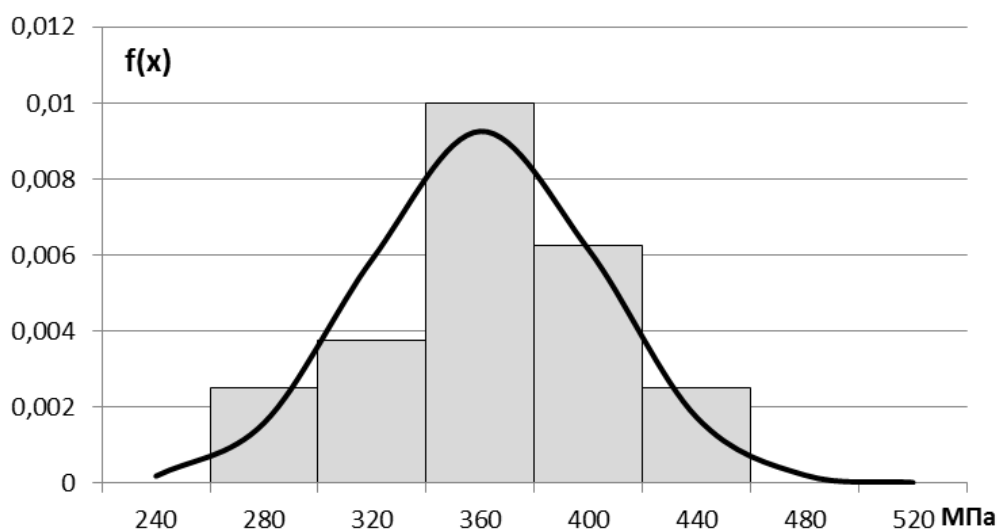


Рис. 1.3 Гістограма розподілу границі текучості сталі

4. Візуальна перевірка показує, що підібраний нормальний закон розподілу близький до дослідної гістограми, що дозволяє використовувати його для імовірнісного опису границі текучості сталі.
5. Величина характеристичного опору сталі за формулою (1.13) дорівнює

$$R_0 = M - t \times S = 270 \text{ МПа},$$

де M і S – середнє значення та стандарт за результатами статистичної обробки вибірки даних;

$t=1,64$ – квантиль нормованого нормального розподілу, що відповідає забезпеченості характеристичного опору $P=0,95$.

6. Величина розрахункового опору сталі за формулою (1.14) дорівнює

$$R = M - \alpha \times S = 238 \text{ МПа},$$

де $\alpha=2,40$ – толерантна межа, що враховує обсяг вибірки $N=20$ зразків та необхідну забезпеченість розрахункового опору.

7. Фактичне значення коефіцієнта надійності за матеріалом дорівнює відношенню характеристичного опору до розрахункового

$$\gamma_m = R_0 / R = 270 / 238 = 1,14.$$

Фактичне значення розрахункового опору за результатами випробувань зразків сталі дорівнює $R_y=238$ МПа, що відповідає маловуглецевій сталі С 235 чи С 245. Отриманий коефіцієнт надійності за матеріалом $\gamma_m=1,14$ та коефіцієнт варіації $V=0,126$ свідчать про підвищений розкид даних порівняно зі звичайними значеннями для маловуглецевих сталей ($1,025 \leq \gamma_m \leq 1,05$ та $0,08 \leq V \leq 0,12$).

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – практичне заняття № 3

Розділ 2

КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ
І МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ

2.1 Базові поняття теорії імовірностей і математичної статистики

Складність і багатофакторність процесів, що відбуваються в суспільстві, природі та техніці, часто приводить до непередбачуваності їх результатів. Такі процеси, явища, події та величини називаються випадковими та аналізуються з використанням методів теорії імовірностей і математичної статистики. Нижче викладені найпростіші поняття й методи статистичного аналізу, застосування яких дозволяє отримувати ряд практично корисних результатів, а також може служити базою для глибшого вивчення імовірнісно-статистичних методів за літературою [4, 7] та іншими джерелами.

Випадковою називають подію, яка в результаті проведення досліду (випробування, вимірювання, спостереження тощо) може реалізуватися або не реалізуватися. Об'єктивною числовою мірою можливості реалізації випадкової події є її **імовірність** P , яка може приймати значення в межах від нуля для неможливої події до одиниці для достовірної події. Подія з імовірністю реалізації $P \approx 0$ вважається практично неможливою, а подія з $P \approx 1$ – практично достовірною. Допустима величина відхилення імовірності від нуля чи одиниці залежить від значимості та наслідків події.

Результатом спостережень чи дослідів часто бувають **випадкові величини**, значення яких неможливо передбачити до проведення досліду. Множина значень, які може приймати випадкова величина в результаті досліду, утворює **область визначення** випадкової величини. Дискретною називають випадкову величину, яка в результаті досліду може приймати одне з ряду фіксованих значень. В техніці частіше зустрічаються неперервні випадкові величини, областю визначення яких є дійсні числа.

Кожен проведений дослід (вимірювання) дає одне конкретне значення вимірюваної величини, яке називається **реалізацією** випадкової величини. В результаті проведення серії дослідів формується набір значень випадкової величини, який називають **вибіркою**. Обсяг вибірки дорівнює кількості наявних значень випадкової величини у вибірці. Множину всіх можливих реалізацій випадкової величини називають генеральною сукупністю.

Головне завдання статистичного аналізу даних полягає в розробленні імовірнісних моделей (залежностей, алгоритмів, методів тощо), які описують досліджувані явища з урахуванням їх випадкової природи. Такі моделі дозволяють прогнозувати імовірності випадкових подій, передбачати можливі

значення випадкових величин, оцінювати рівень якості та надійності виробів, аналізувати доцільність інженерних та управлінських рішень. Предметом математичної статистики є також планування необхідного обсягу експерименту, оцінювання точності результатів спостережень, відповідності теорії до експерименту. Статистичні методи дозволяють встановлювати відсутність чи наявності зв'язку між випадковими величинами та отримувати залежності, що дають можливість прогнозувати значення одних величин через результати спостережень за іншими, а також розв'язувати безліч інших практично важливих задач.

Рекомендовані джерела інформації:

[8] – сторінки 3 18–21, 24–27, 187–192

2.2 Закон розподілу та числові характеристики випадкових величин

Випадковою називається величина, значення якої неможливо передбачити до проведення досліду. Випадкові величини задаються законом розподілу та числовими характеристиками, основні з яких описані нижче.

Вичерпною характеристикою випадкової величини є її **закон розподілу**, який встановлює аналітичну, табличну чи графічну залежність між значеннями випадкової величини та імовірностями їх реалізації. Закон розподілу неперервної випадкової величини може задаватися у вигляді функції розподілу чи густини імовірності.

Функція розподілу $F(x)$ дорівнює імовірності того, що випадкова величина X прийме значення, менше від x :

$$F(x) = P\{X < x\}, \quad (2.1)$$

де X і x – випадкова величина та її конкретне значення;

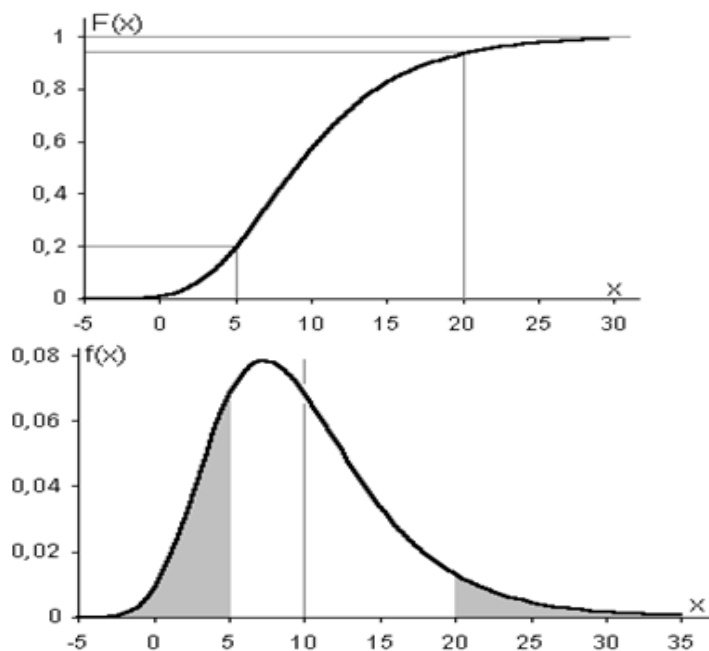
$P\{.\}$ – імовірність події, описаної у фігурних дужках.

Функція розподілу в межах області визначення випадкової величини монотонно зростає від нуля до одиниці. Якщо область визначення випадкової величини обмежена $a \leq X < b$, то $F(a) = 0$, $F(b) = 1$. При нескінченній області визначення $F(-\infty) = 0$, $F(+\infty) = 1$.

Першу похідну функції розподілу називають **густиною імовірності**, або **густиною розподілу**. Густина імовірності $f(x)$ вказує на імовірність реалізації значень випадкової величини в околі x . Графіки густини імовірності можуть мати різноманітний характер, але всі вони повинні лежати вище від осі абсцис і задовольняти умову нормування

$$f(x) \geq 0 ; \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1. \quad (2.2)$$

Характерний приклад функції та густини розподілу неперервної випадкової величини з необмеженою областю визначення наведено на рисунку 5.1. Найімовірнішими є значення в межах приблизно від 5 до 15, а імовірність реалізації інших значень зменшується в міру віддалення від цього інтервалу.



а) функція розподілу Гумбеля
з характеристиками:
 $M=10$; $S=6$
 $F(5)=0,195$; $F(20)=0,936$

б) густина розподілу Гумбеля
з характеристиками:
 $M=10$; $S=6$
 $P\{x < 5\} = F(5) = 0,195$
 $P\{x > 20\} = 1 - F(20) = 0,064$

Рис. 2.1. Функція та густина розподілу неперервної випадкової величини

Густина і функція розподілу зв'язані співвідношеннями

$$f(x) = F'(x) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} ; \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt , \quad (2.3)$$

завдяки характеру яких функцію розподілу $F(x)$ інколи називають інтегральною функцією розподілу. Зв'язок між густиною та функцією розподілу відображено на рисунку 2.1. Як слідує з формули (2.3), площа області $x < 5$, відміченої на графіку густини імовірності, дорівнює значенню функції розподілу $F(5)=0,195$.

Для імовірнісного подання випадкових величин використовуються закони розподілу різних видів, які відрізняються математичним обґрунтуванням, аналітичними виразами, областями визначення, виглядом густини імовірності та іншими властивостями. Деякі найбільш поширені закони розподілу описані нижче. При відомому виді закону розподілу його форма залежить від числових характеристик випадкової величини, основними з яких є математичне сподівання, дисперсія та стандарт, коефіцієнти варіації та асиметрії.

Математичне сподівання (середнє значення) визначає положення центра розподілу випадкової величини і має розмірність самої випадкової величини. При відомій густині розподілу $f(x)$ та області визначення $a < x < b$ воно може бути визначене за формулою

$$M = \int_a^b f(x) dx. \quad (2.4)$$

Розкид випадкової величини відносно математичного сподівання відображається **дисперсією**, яку можна визначити за відомим математичним сподіванням та густиною розподілу:

$$D = \int_a^b (x - M)^2 f(x) dx. \quad (2.5)$$

Дисперсія (2.5) має розмірність квадрата випадкової величини. Більш зручною характеристикою розкиду є **стандарт** (стандартне відхилення, середнє квадратичне відхилення), який має розмірність самої випадкової величини:

$$S = \sqrt{D}. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт варіації є відносною мірою розкиду випадкової величини відносно центру розподілу і визначається за формулою

$$V = \frac{S}{M} \quad \text{або} \quad V = \frac{S}{M} \times 100\%. \quad (2.7)$$

Відповідно до використаної формули, коефіцієнт варіації є безрозмірною величиною або виражається у відсотках.

Коефіцієнт асиметрії відображає міру несиметричності графіка густини розподілу та обчислюється за вказівками [8]. В певних випадках використовуються також інші числові характеристики, смисл і методи визначення яких викладені в [8].

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додаток А

[8] – сторінки 64–66, 111–127

2.3 Поширені закони розподілу випадкових величин

Завершальним етапом статистичної обробки вибірки випадкової величини є вибір теоретичного розподілу з урахуванням фізичної природи досліджуваної величини та вигляду гістограми, а також визначення параметрів обраного розподілу з умови забезпечення рівності числових характеристик

теоретичного розподілу та проаналізованої вибірки. Нижче описані закони розподілу, які часто вживаються в дослідженнях надійності та при нормуванні навантажень: нормальний, логнормальний, Гумбеля та експоненціальний.

Нормальний закон розподілу (розподіл Гауса) є граничним розподілом, до якого наближається сума багатьох випадкових величин. Тому він широко застосовується для опису випадкових величин, які формуються в результаті впливу багатьох випадкових факторів. Нормальний розподіл має нескінчену область визначення $-\infty < x < +\infty$ і задається двома параметрами, рівними математичному сподіванню M та стандарту S випадкової величини. Графік його густини має симетричну пагорбоподібну форму й описується формулою

$$f(x) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-M)^2}{2 S^2} \right]. \quad (2.8)$$

Інтегральна функція нормального розподілу $F(x)$ не має аналітичного виразу, а тому визначається за спеціальними таблицями залежно від аргументу

$$t = (x - M) / S. \quad (2.9)$$

Таблиці нормального розподілу, наведені в таблиці А.1 та в літературі [5, 8], дозволяють також розв'язувати обернену задачу: визначати нормований аргумент t за заданим значенням функції розподілу $F(t)$. При використанні таблиць слід пам'ятати, що $F(-t) = 1 - F(t)$. Для обчислень у середовищі табличного процесора EXCEL можна скористатися статистичними функціями $\text{НОРМРАСП}(x, M, S, I)$ і $\text{НОРМОБР}(F, M, S)$, параметри яких позначені вище. При $I=0$ функція $\text{НОРМРАСП}(\cdot)$ обчислює густину розподілу (2.8), а при $I=1$ – інтегральну функцію розподілу, відповідну загальному виразу (2.1).

Логнормальний (логарифмічно нормальний) закон розподілу описує випадкову величину, логарифм якої розподілений за нормальним законом. Він визначений в області додатних чисел $x > 0$ та відображає граничний розподіл добутку багатьох випадкових величин. Густина логнормального розподілу має пагорбоподібну форму з правосторонньою асиметрією й описується виразом

$$f(x) = \frac{1}{\beta x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \alpha)^2}{2\beta^2} \right], \quad (2.10)$$

де α і β – параметри, які визначаються через середнє значення M та коефіцієнт варіації вибірки V за формулами

$$\beta = \sqrt{\ln(V^2 + 1)}; \quad \alpha = \ln(M) - \beta^2 / 2. \quad (2.11)$$

Оскільки логнормальний закон не має аналітичного виразу інтегральної функції розподілу, вона визначається за таблицею нормального розподілу А.1 залежно від аргументу

$$t = (\ln x - \alpha) / \beta, \quad (2.12)$$

або в середовищі табличного процесора EXCEL з використанням статистичних функцій *НОРМРАСП(ln x, α, β, 1)* і *НОРМОБР(F, α, β)*.

Закон розподілу Гумбеля (подвійний експоненціальний розподіл) є граничним розподілом найбільшого елемента вибірки випадкової величини, чим пояснюється його широке застосування для опису екстремальних значень різних величин, у тому числі найбільших протягом місяця чи року значень кліматичних факторів. Область визначення розподілу Гумбеля нескінченна $-\infty < x < +\infty$, а графік густини імовірності має пагорбоподібну форму з правосторонньою асиметрією при незмінному коефіцієнті асиметрії $A=1,14$ та описується формулою

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp \left[\frac{\alpha - x}{\beta} - \exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right], \quad (2.13)$$

де α і β – параметри, які наближено визначаються за формулами

$$\alpha = M - 0,45 S; \quad \beta = 0,78 S. \quad (2.14)$$

Інтегральна функція розподілу Гумбеля має аналітичний вираз

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right], \quad (2.15)$$

який дозволяє обчислювати імовірності перевищення заданих значень, а також аналітично визначати аргумент розподілу за заданою забезпеченістю, двічі прологарифмувавши вираз (2.15). Приклад інтегральної функції та густини розподілу Гумбеля наведено на рисунку 2.1.

Експоненціальний закон розподілу часто вживається в теорії масового обслуговування, теорії надійності та в інших галузях науки. Він визначений в області додатних дійсних чисел $x \geq 0$ в має аналітичні вирази густини та інтегральної функції розподілу

$$f(x) = \beta e^{-\beta x}; \quad F(x) = 1 - e^{-\beta x}, \quad (2.16)$$

де $\beta = 1/M$ – параметр, обернено пропорційний математичному сподіванню.

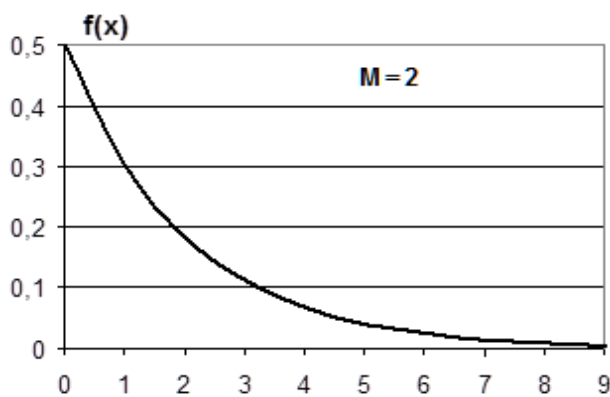


Рис. 2.2 Густина експоненціального розподілу при $M=2$, $\beta=0,5$

Приклад густини експоненціального розподілу наведено на рисунку 2.2. Характерною особливістю цього розподілу є незмінні значення коефіцієнта варіації $V=1$ та коефіцієнта асиметрії $A=2$. Аналітичний вираз (2.16) дозволяє обчислювати інтегральну функцію розподілу. Аргумент розподілу x обчислюється за заданою забезпеченістю F шляхом логарифмування (2.16).

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додаток Б

[8] – сторінки 122–139, 149–152

2.4 Поняття про випадкові процеси та поля

Імовірнісна модель випадкової величини придатна для опису величин, незмінних у часі. У практиці наукових досліджень часто доводиться оперувати з величинами, які випадковим чином змінюються в часі. Такими є переважна більшість змінних навантажень і впливів на будівлі та будівельні конструкції, процеси накопичення експлуатаційних пошкоджень, зміни технічних характеристик будівельних матеріалів і виробів унаслідок старіння та деградації, процеси набору міцності бетону, інші подібні явища.

Випадковими процесами називають функції часу, які змінюються випадковим чином і значення яких неможливо передбачити до проведення досліду чи спостереження. Значення випадкового процесу в фіксований момент часу називають його ординатою, а послідовність цих значень, отриману в результаті спостереження протягом певного відрізка часу – реалізацією випадкового процесу.

Випадкові процеси характеризуються законом розподілу ординати та його числовими характеристиками, а також характеристиками частотної структури, які відображають швидкість випадкових змін ординати. **Стаціонарними** називають випадкові процеси, характеристики яких є незмінними в часі. Процеси, числові характеристики яких істотно змінюються в часі, називають нестаціонарними. В якості прикладу на рисунку 2.3 наведені реалізації випадкових процесів змін температури атмосферного повітря та повітря в житловому приміщенні на протязі опалювального періоду.

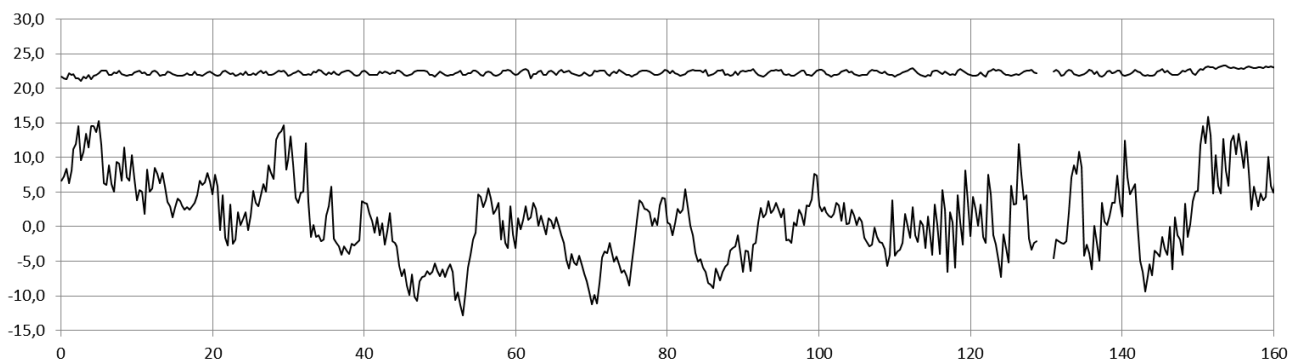


Рис. 2.3 Реалізації випадкових процесів змін температури повітря

З рисунка видно, що зміни температури повітря в приміщенні утворюють стаціонарний випадковий процес із середнім значенням близько 22°C та розмахом в межах 2°C . Процес змін температури атмосферного повітря (нижня реалізація на рисунку 2.3) є нестаціонарним унаслідок виражених сезонних змін погоди. Однак на невеликому відрізку часу порядку тижня чи декади зміни середнього значення й стандарту є незначними, що дозволяє приблизно вважати цей процес стаціонарним на таких відрізках часу. Такого виду випадкові процеси, характеристики яких змінюються набагато повільніше порівняно з випадковими змінами ординати, називають **квазістаціонарними**. Імовірнісною моделлю квазістаціонарного випадкового процесу добре описуються більшість кліматичних навантажень і впливів на будівельні конструкції, будівлі та споруди.

Не дивлячись на непередбачуваність змін, близькі за часом ординати випадкових процесів пов'язані між собою, а збільшення різниці в часі призводить до послаблення такого зв'язку. Наприклад, температура повітря чи швидкість вітру протягом години змінюються мало, протягом доби можуть відбутися значні зміни, а зв'язок між ординатами, віддаленими на декілька діб, практично повністю втрачається. Міра зв'язності випадкового процесу характеризується його **нормованою кореляційною функцією**, яка близька до одиниці для сусідніх ординат і зменшується по мірі їх віддалення в часі. Більш простим параметром частотної структури випадкового процесу є **ефективна частота**, рівна середньозваженій частоті періодичних змін ординати. Ефективна частота відображає швидкість випадкових коливань дослідженого процесу і використовується при розв'язанні більшості задач дослідження й нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції.

Випадковим полем називають випадкову функцію декількох координат. Наприклад, розподіл постійного навантаження по поверхні покрівлі утворює випадкове поле, аргументами якого є координатами точки по довжині та ширині будівлі, а функцією – значення навантаження в цій точці. Снігове навантаження на покрівлю чи технологічне навантаження на перекриття

випадковим чином змінюються не лише по поверхні покриття чи перекриття, але й у часі. У цьому випадку слід говорити про випадкове поле з трьома аргументами: дві координати точки на поверхні та час.

Більш детальну інформацію про випадкові процеси та поля, зокрема їх класифікацію, можливості використання для імовірнісного опису роботи будівельних конструкцій, способи визначення статистичних характеристик, методи оперування з метою розв'язання науково-інженерних задач можна знайти в літературі [4, 8]. Відмітимо, що розроблення імовірнісних моделей випадкових процесів та випадкових полів, визначення необхідних статистичних характеристик вимагає виконання досить складного аналізу статистичних даних, обсяг яких багатократно перевищує звичайні обсяги вибірок випадкових величин. Набагато складнішим є також оперування з імовірнісними моделями випадкових процесів та полів при розв'язанні практичних наукових та інженерних задач, що істотно обмежує галузь використання цих моделей.

Рекомендовані джерела інформації:

[8] – сторінки 386–430

2.5 Порядок статистичної обробки вибірок випадкових величин

Предметом статистичного аналізу є вибірка значень випадкової величини, отримана в результаті вимірювань чи спостережень. Кінцевою метою статистичної обробки є встановлення числових характеристик та закону розподілу випадкової величини за наявними дослідними даними.

Статистична обробка вибірок випадкових величин звичайно виконується на персональних комп'ютерах із використанням відомих програмних комплексів. Вибірки незначного обсягу можна також обробити за допомогою калькулятора з умонтованим режимом статистики. Існує велика кількість різноманітних програмних комплексів для статистичного аналізу даних, які відрізняються набором операцій, можливостями подання результатів, зручністю інтерфейсу та доступністю для використання. Нижче рекомендовані способи статистичної обробки даних у середовищі табличного процесора Microsoft Excel, який має достатньо широкий набір вбудованих статистичних функцій і є доступним практично на кожному персональному комп'ютері та принаймні в загальних рисах відомим переважній більшості користувачів.

Статистична обробка вибірок випадкових величин включає ряд етапів, перелічених нижче і детально описаних у наступних питаннях.

1. Формування вибірки даних на машинних носіях інформації та її попередній аналіз на предмет відповідності генеральній сукупності (аналіз способу

відбору даних) та наявності очевидно грубих помилок (похибок запису результатів спостережень чи занесення в пам'ять комп'ютера). Для цього можна відсортувати вибірку за зростанням чи зменшенням даних, визначити й оцінити мінімальне та максимальне значення. Ці операції легко виконати в середовищі Excel, скориставшись відповідними статистичними функціями, командами меню чи інформацією рядка стану.

2. Обчислення числових характеристик (середнє значення, стандарт, коефіцієнти варіації та асиметрії тощо) і побудова гістограми розподілу, яка є статистичним еквівалентом густини імовірності випадкової величини і графічно відображає характер розподілу імовірностей реалізації різних значень досліджуваної випадкової величини.
3. Перевірка елементів вибірки, які різко відхиляються від основної маси даних (артефактів), на належність до вибірки. Така перевірка здійснюється з використанням спеціальних статистичних критеріїв, один з яких описаний у [8]. Перевірка здійснюється послідовно, по одному елементу, який найбільше відхиляється від центра вибірки. Якщо перевірений елемент визнано грубою помилкою і відкинуто, необхідно заново визначити числові характеристики і відкоригувати гістограму розподілу. Рішення щодо визнання якогось елемента вибірки помилковим слід приймати дуже обережно, особливо у випадку сильно асиметричних розподілів.
4. Вибір виду закону розподілу для імовірнісного опису досліджуваної випадкової величини, визначення його параметрів, побудова кривої густини імовірності на гістограмі та візуальний аналіз їх відповідності.
5. Перевірка обраного закону розподілу на відповідність до дослідних даних з використанням критеріїв узгодженості за методикою, описаною нижче. Якщо обраний закон розподілу не суперечить дослідним даним, його можна використовувати для імовірнісного опису дослідженої випадкової величини та оперування з нею при розв'язанні наукових чи інженерних задач.

Результатом статистичної обробки є числові характеристики та закон розподілу випадкової величини, які дозволяють оцінювати імовірності попадання дослідженої величини в певні межі, встановлювати розрахункові значення за заданою забезпеченістю, а також розв'язувати інші наукові та інженерні задачі імовірнісного характеру.

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додаток А

[8] – сторінки 187–196

2.6 Визначення числових характеристик і побудова гістограми розподілу

Статистичну обробку вибірок випадкових величин можна виконувати вручну за наведеними нижче алгоритмами та формулами, або на комп'ютері з використанням відомих математичних чи статистичних пакетів програм, які реалізують ці формули. Досить зручним способом є використання табличного процесора Microsoft Excel, доступного практично на кожному персональному комп'ютері. Нижче наведені рекомендації щодо виконання статистичної обробки даних у середовищі Microsoft Excel.

Позначимо обсяг вибірки через N , а кожен її елемент (одержане в результаті окремого вимірювання значення випадкової величини) через X_i . В середовищі Microsoft Excel для обчислення статистичних характеристик та побудови гістограми розподілу випадкової величини використовуються вбудовані статистичні функції. Аргумент „список” звичайно визначає область робочої сторінки, в комірки якої занесені елементи вибірки. Для визначення списку слід просто „обвести” необхідну область курсором миші під час введення функції через меню „ВСТАВКА, ФУНКЦІЯ”. Оскільки статистичні функції ігнорують пусті комірки, область робочого листа „список” може бути більшою за наявну вибірку. Це дозволяє створювати бланки, у які досить занести дані, щоб виконати їх статистичну обробку. Відмітимо, що в різних версіях Microsoft Office імена описаних нижче функцій можуть дещо відрізнятися, але є досить близькими до розпізнання, а їх призначення можна уточнити за коротким описом, який надається при виборі функції.

Розмах вибірки задається найменшим X_{min} і найбільшим X_{max} спостереженими значеннями. В середовищі EXCEL використовуються функції МИН(список) та МАКС(список).

Середнє значення (оцінка математичного сподівання) визначає положення центра розподілу випадкової величини та визначається за формулою

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.17)$$

Стандарт (стандартне відхилення, середнє квадратичне відхилення) характеризує міру розкиду випадкової величини відносно центра розподілу й обчислюється за формулою

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M)^2} \quad (2.18)$$

В середовищі Excel середнє значення й стандарт обчислюється за функціями СРЗНАЧ(список) і СТАНДОТКЛОН(список).

Коефіцієнт варіації є відносною мірою розкиду випадкової величини і визначається за формулою

$$V = S/M, \quad (2.19)$$

яку потрібно записати у необхідну комірку робочого листа Excel з посиланнями на комірки, до обчислені значення M і S .

Коефіцієнт асиметрії є мірою несиметричності розподілу відносно середнього значення й обчислюється з використанням функції СКОС(список), яка реалізує формули, наведені в [8].

Гістограма розподілу є статистичним еквівалентом густини розподілу випадкової величини. Побудова гістограми розподілу розпочинається з визначення розмаху вибірки як інтервалу між найменшим X_{min} і найбільшим X_{max} зі спостережених значень. Отримана таким чином область визначення випадкової величини розбивається на інтервали, кількість яких L вибирається залежно від обсягу вибірки N за рекомендацією наступної таблиці:

N =	10 – 40	40 – 100	100 – 300	300 – 1000	1000 – 5000
L =	4 – 6	5 – 8	6 – 10	8 – 15	10 – 25

Межі інтервалів C_j , $j=0,...,L$ встановлюються, виходячи з довжини інтервалу, обчисленої за формулою

$$d = (X_{max} - X_{min})/L \quad (2.20)$$

та округленою до значення, зручного для подальшого використання. Нижня межа першого інтервалу C_0 округлюється в менший бік, а верхня межа останнього C_L – у більший. Округлення довжини інтервалу d може привести до коригування їх кількості L .

Побудова гістограми розподілу зводиться до підрахунку кількостей даних N_j , які належать до кожного з вибраних інтервалів. Це робиться шляхом перегляду вибірки вручну чи за допомогою комп'ютера. Крайні інтервали, які містять мало даних, рекомендується об'єднати. Довжина об'єднаного інтервалу дорівнює сумі довжин, а кількість даних – сумі кількостей даних для інтервалів, що об'єднуються. Бажано, щоб у кожному інтервалі було не менше ніж 3–5 даних. Об'єднання інтервалів приводить до згладжування гістограми розподілу і таким чином дозволяє відмежуватися від випадкових коливань частот попадання до інтервалів при невеликих обсягах вибірок.

Імовірності попадання до кожного з інтервалів (частоти даних) P_j визначають діленням відповідних кількостей даних N_j на обсяг вибірки N :

$$P_j = N_j / N. \quad (2.21)$$

Густина імовірності в кожному інтервалі є результатом ділення частоти P_j на довжину даного інтервалу $d_j = C_j - C_{j-1}$:

$$f_j = \frac{P_j}{d_j} = \frac{P_j}{(C_j - C_{j-1})}. \quad (2.22)$$

При цьому слід пам'ятати, що різні інтервали можуть мати різну довжину. Для побудови гістограми розподілу в середовищі табличного процесора EXCEL використовується функція ЧАСТОТА(список, C_j), яка визначає кількість даних в області „список”, менших за задану межу j -того інтервалу C_j . На графічному зображенні гістограми розподілу уздовж осі абсцис відкладаються межі інтервалів, а уздовж осі ординат – значення густини імовірності (2.22). Збудована таким чином гістограма розподілу представляє собою сукупність прямокутників, основи яких відповідають межах інтервалів, а висоти дорівнюють густині розподілу для відповідного інтервалу. Площа кожного з прямокутників дорівнює імовірності попадання випадкової величини до відповідного інтервалу (2.21). Загальний вигляд гістограми відображає форму графіка густини імовірності дослідженої випадкової величини.

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додаток А

[8] – сторінки 192–207

2.7 Вибір закону розподілу на підставі статистичного аналізу дослідних даних

Числові характеристики та гістограма розподілу вибірки дозволяють описати дослідні дані теоретичним законом розподілу. Для цього необхідно вибрати його вид, визначити параметри та перевірити узгодженість із дослідними даними. Вид теоретичного розподілу вибирається з урахуванням таких факторів:

- фізичного обґрунтування досліджуваного явища (наприклад, нормальний розподіл придатний для опису суми багатьох випадкових величин, логнормальний – добутку випадкових величин, розподіл Гумбеля добре описує максимальні елементи вибірок);

- досвіду попередніх досліджень (наприклад, відомо, що розподіли технічних характеристик будівельних матеріалів добре описуються нормальним законом розподілу, розподіли річних чи місячних максимумів кліматичних навантажень відповідають закону Гумбеля);
- вигляду гістограми розподілу, якій повинна відповідати форма кривої густини імовірності обраного теоретичного закону розподілу;
- співвідношення числових характеристик, яке може служити додатковим свідченням придатності обраного закону розподілу (наприклад, коефіцієнт асиметрії розподілу Гумбеля дорівнює $A=1,14$, а для експоненціального розподілу характерні значення коефіцієнта варіації $V=1$ та коефіцієнта асиметрії $A=2$).

Параметри обраного закону розподілу визначаються за методом моментів, який забезпечує рівність числових характеристик теоретичного розподілу та проаналізованої вибірки. Співвідношення та формули, необхідні для визначення параметрів нормального, логнормального та експоненціального законів розподілу, а також розподілу Гумбеля, наведені вище при описі цих розподілів. Параметри інших законів розподілу можна визначити, керуючись вказівками літературних джерел, у яких ці закони описані.

За обчисленими параметрами та аналітичним виразом густини імовірності обраного розподілу обчислюються значення густини для ряду значень випадкової величини (як правило, для меж інтервалів побудованої гістограми розподілу) і на гістограму наноситься графік густини імовірності. Візуальна відповідність теоретичної кривої густини імовірності до дослідної гістограми є першим орієнтовним свідченням відповідності обраного закону розподілу до дослідних даних та правильності визначення його параметрів.

Остаточне рішення щодо можливості застосування обраного закону розподілу приймається за результатами перевірки його узгодженості з дослідними даними. Для цього використовують спеціальні статистичні критерії узгодженості, найпоширенішим із яких є **критерій Пірсона**. Згідно з [8], статистика критерію Пірсона обчислюється за формулою

$$\chi^2 = N \sum_{j=1}^L \frac{(P_j - P_{jt})^2}{P_{jt}}, \quad (2.23)$$

де L – кількість інтервалів у гістограмі;

N – обсяг вибірки, за якою збудована гістограма розподілу;

P_j – емпірична імовірність попадання випадкової величини до j -того інтервалу, визначена за гістограмою розподілу;

$P_{jt} = F(C_j) - F(C_{j-1})$ – теоретична імовірність попадання випадкової величини до j -того інтервалу, визначена за обраним законом розподілу.

Обчислене за формулою (2.23) вибіркве значення статистики χ^2 порівнюється з критичним значенням $\chi_{cr}^2(\alpha, k)$, визначеним за таблицею розподілу Пірсона з [5, 8] чи таблиці А.2, залежно від рівня значимості α та кількості ступенів свободи k . Рівень значимості α встановлює імовірність відкидання правильної гіпотези (визнання невідповідним теоретичного розподілу, який насправді узгоджується з дослідними даними). В статистичних дослідженнях часто приймають рівень значимості $\alpha=0,05$. При $\alpha<0,01$ слід констатувати явну невідповідність обраного закону розподілу до дослідних даних. Кількість ступенів свободи k дорівнює кількості інтервалів в гістограмі розподілу L , зменшеній на кількість параметрів вибраного теоретичного закону розподілу і ще на одиницю. Для нормального, логнормального та розподілу Гумбеля $k=L-3$; для експоненціального розподілу $k=L-2$.

Якщо $\chi^2 \leq \chi_{cr}^2$, вибраний закон розподілу не суперечить дослідним даним і його можна використовувати для імовірнісного опису дослідженої випадкової величини. При $\chi^2 > \chi_{cr}^2$ для імовірнісного опису дослідних даних слід вибрати закон розподілу іншого виду.

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додаток А

[8] – сторінки 245–251, 329–335

2.8 Імовірнісне оцінювання та нормування розрахункових значень

Відомий закон розподілу випадкової величини дозволяє розв'язувати ряд практично корисних завдань, одним із яких **оцінювання імовірності попадання** випадкової величини X до заданого інтервалу $[a, b]$ через відому функцію розподілу $F(x)$ чи густину імовірності $f(x)$:

$$P\{a \leq X < b\} = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x) dx. \quad (2.24)$$

На практиці часто зустрічаються випадки, коли необхідно визначити імовірність виходу випадкової величини за встановлену односторонню межу. Вважаючи протилежну нижню чи верхню межу згаданого вище інтервалу $[a, b]$ нескінченною, із загальної формули (2.24) легко отримати:

$$P\{X < b\} = F(b) = \int_{-\infty}^b f(x) dx, \quad (2.25)$$

$$P\{X > a\} = 1 - F(a) = \int_a^{+\infty} f(x) dx. \quad (2.26)$$

Загальні формули (2.24) – (2.26) виведені з визначення функції розподілу (2.1) та залежностей (2.3). Підставляючи до них конкретні вирази функції розподілу $F(x)$, можна отримати робочі формули для розподілу Гумбеля

$$P\{X < b\} = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - b}{\beta}\right)\right]; \quad P\{X > a\} = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - a}{\beta}\right)\right], \quad (2.27)$$

а також для експоненціального розподілу:

$$P\{X < b\} = 1 - e^{-\beta b}; \quad P\{X > a\} = e^{-\beta a}. \quad (2.28)$$

Для функції нормального розподілу, яка не має аналітичного виразу, імовірність виходу випадкової величини за нижню чи верхню межу дорівнює

$$P\{X < b\} = F(b); \quad P\{X > a\} = 1 - F(a), \quad (2.29)$$

де $F(a)$ і $F(b)$ – значення функції нормального розподілу, визначене за таблицею через нормований аргумент (2.9) або за функцією Excel *НОРМРАСП(ln x, M, S, 1)*.

Не менш важливою для практики є обернена задача, яку часто називають задачею **нормування розрахункових значень** досліджуваних параметрів технічних об'єктів чи природних явищ. Розрахунковим вважають граничне (максимальне чи мінімальне) значення досліджуваного параметра, імовірність виходу за яке повинна бути досить малою. Імовірність протилежної події, тобто збереження параметра в бажаних межах, називають **забезпеченістю** розрахункового значення. Наприклад, класом міцності бетону вважається найменше значення міцності при стиску із забезпеченістю 0,95. Це означає, що міцність 95% випробуваних зразків перевищує значення класу бетону, а міцність 5% зразків може відхилитися від нього в небезпечну, меншу сторону. Розрахункові значення навантажень на будівельні конструкції приймаються рівними верхній межі навантаження із забезпеченістю, близькою до одиниці.

Підставивши функцію експоненціального розподілу (2.16) до (2.25) і прологарифмувавши отриманий вираз, визначаємо верхню межу випадкової величини із забезпеченістю F :

$$X_{\max} = -\ln(1 - F) / \beta. \quad (2.30)$$

Підстановка функції розподілу Гумбеля (2.15) до (2.25), подвійне логарифмування та розв'язання отриманого рівняння дає формулу для обчислення верхньої межі випадкової величини із забезпеченістю F :

$$X_{\max} = \alpha - \beta \ln(-\ln F). \quad (2.31)$$

Нижня й верхня межа нормально розподіленої випадкової величини із забезпеченістю F можна обчислити з використанням вбудованої функції Excel $\text{НОРМОБР}(F, M, S)$, або за формулами

$$X_{\min} = M - t S ; \quad X_{\max} = M + t S , \quad (2.32)$$

де M і S – математичне сподівання та стандарт;

t – нормований аргумент (6.2), визначений за таблицею А.1 для заданого значення функції нормального розподілу.

Подібним чином встановлюються розрахункові опори будівельних матеріалів та розрахункові значення навантажень, що використовуються в розрахунках несучих будівельних конструкцій.

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додатки А, Б

[8] – сторінки 132–135

2.9 Кореляція та регресія випадкових величин

Об'єкти досліджень часто описуються сукупністю декількох ознак, які відображають різні властивості одного й того ж об'єкта. Наприклад, кожен зразок будівельного матеріалу має певну середню густину, пористість, водопоглинання, границю міцності на стиск і на згин та інші технічні характеристики. Всі ці показники є випадковими величинами, значення яких змінюються від зразка до зразка, але при цьому можуть бути взаємно залежними. Очевидно, що при збільшенні пористості зростає водопоглинання, але зменшуються середня густина та границя міцності матеріалу.

Розглянемо дві випадкові змінні X і Y , отримані в результаті парного експерименту, тобто виміряні на одному й тому ж об'єкті. Якщо між ними існує **функціональна залежність**, то кожному конкретному значенню X відповідає конкретне детерміноване (точно визначене) значення Y . **Стохастична залежність** полягає в тому, що конкретному значенню X відповідає ряд випадкових значень Y , які мають певний статистичний розкид. Якщо набір можливих значень (розподіл) випадкової величини Y змінюється при зміні значень X , такі випадкові величини називають **залежними**. Так, маса тіла студента не залежить від порядкового номера у списку групи, але залежить від його віку та зросту.

Результати парного експерименту можна зобразити графічно, відклавши вздовж однієї осі значення випадкової величини X , а вздовж іншої – значення Y . Такий графік можна побудувати в середовищі Microsoft Excel як діаграму виду "точечная". Кожна пара даних, яка характеризує один і той же об'єкт (зріст і маса тіла певної людини, середня густина та межа міцності певного зразка легкого бетону тощо), утворює на графіку одну точку. За таким графіком можна візуально встановити наявність і характер залежності між проаналізованими випадковими величинами.

Статистичною мірою тісноти лінійного (або близького до лінійного) зв'язку між двома випадковими величинами є **коефіцієнт кореляції**, який обчислюється за формулою

$$R_{xy} = \frac{1}{(N-1) S_x S_y} \sum_{i=1}^N (X_i - M_x)(Y_i - M_y), \quad (2.33)$$

де N – обсяг кожної з вибірок;

X_i і Y_i – відповідні елементи вибірок, які відображають результати парного експерименту для одного і того ж об'єкта;

M_X і M_Y – оцінки математичних сподівань (середні значення) обох вибірок;

S_X і S_Y – оцінки стандартів обох вибірок.

При статистичній обробці даних в середовищі табличного процесора Microsoft Excel коефіцієнт кореляції зручно обчислювати з використанням функції *KORPEЛ*(масив_X; масив_Y).

За значенням коефіцієнта кореляції можна судити про наявність і характер зв'язку між випадковими величинами. Коефіцієнт кореляції незалежних випадкових величин, зображених на рисунку 2.4 а, наближається до нуля. Відмінність коефіцієнта кореляції від нуля свідчить про наявність зв'язку між випадковими величинами, а його близькість за модулем до одиниці – про близькість цього зв'язку до лінійного функціонального. При $R_{XY} > 0$ (рисунок 2.4 б) збільшення величини X викликає зростання Y , а при $R_{XY} < 0$ (рисунок 2.4 в), навпаки, більшим значенням X відповідають менші Y .

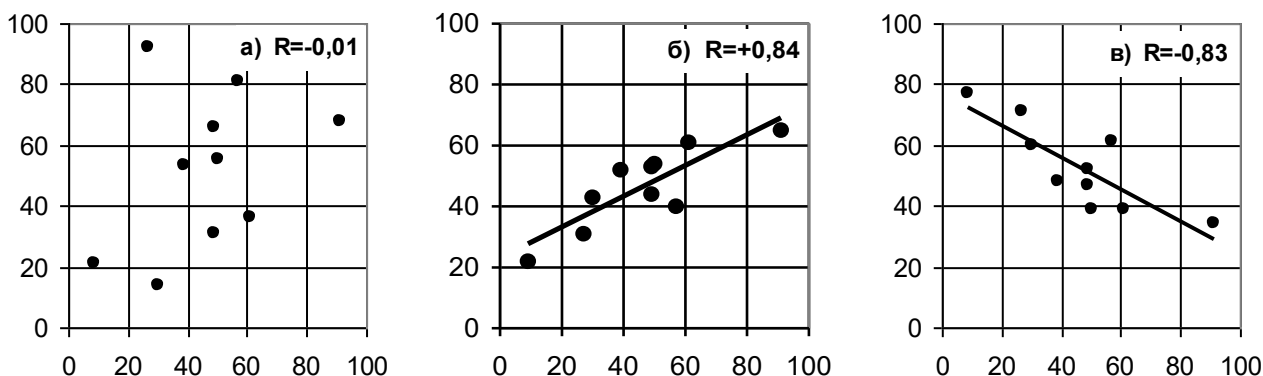


Рис. 2.4 Приклади залежностей між випадковими величинами

Якщо між проаналізованими величинами існує досить тісний зв'язок (вважається, що при значеннях коефіцієнта кореляції $|R_{XY}| > 0,7$), залежність між ними можна описати **рівнянням лінійної регресії** виду

$$Y = A + B \times X . \quad (2.34)$$

Параметри A , B апроксимуючої лінійної функції (2.34) визначаються методом найменших квадратів, який забезпечує мінімізацію суми квадратів відхилень дослідних значень Y від апроксимуючої прямої (2.34). Для цього вони обчислюються за формулами

$$A = R_{XY} S_Y / S_X ; \quad B = M_Y - A M_X , \quad (2.35)$$

усі позначення яких відповідають формулі (2.33). При використанні табличного процесора Excel параметри лінійного рівняння регресії (2.34) можна обчислити за формулами (2.35) або отримати на побудованій діаграмі типу „точечная”, виконавши команду „вставити лінію тренда”.

Із рисунків 2.4 б і 2.4 в видно, що апроксимуючі прямі (2.34) описують дослідні залежності „у середньому”. Реальні дослідні значення Y випадковим чином відхиляються від апроксимуючої прямої. Величина розкиду зменшується до нуля при зростанні модуля коефіцієнта кореляції до одиниці, що відповідає перетворенню стохастичної залежності в функціональну.

Залежності між властивостями об'єктів дослідження, отримані шляхом парних експериментів, можуть мати нелінійний характер. Апроксимація таких залежностей виконується методом найменших квадратів із використанням різноманітних аналітичних функцій. При виборі виду апроксимуючої функції слід ураховувати вигляд залежності та точність апроксимації, асимптотичну поведінку апроксимуючої функції при зменшенні чи зростанні аргументу, а також зручність подальшого використання обраної апроксимуючої функції.

Досить універсальною і зручною для використання функцією, яка часто вживається для апроксимації різних залежностей, є алгебраїчний поліном виду

$$Y = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + \dots + A_K X^K . \quad (2.36)$$

Значна кількість екстремумів (на одиницю менша від ступеня полінома K) зумовлює гнучкість отриманої кривої; тому на практиці рідко доводиться використовувати поліноми вище від 5–6 ступеня. Підбір параметрів $A_0 \dots A_K$ полінома (2.36) реалізовано в багатьох прикладних програмах, у тому числі в табличному процесорі Excel за допомогою операції „вставити лінію тренда” в побудованій діаграмі типу „точечная”. Основним недоліком алгебраїчного полінома є непередбачуваність його асимптотичної поведінки, що не дозволяє використовувати функцію (2.36) поза межами області зміни аргумента дослідних точок, використаних для апроксимації.

У практиці апроксимації нелінійних емпіричних залежностей часто використовується сімейство двохпараметричних функцій, які мають досить прості аналітичні вирази:

$$\begin{aligned} Y &= A + B/X; & Y &= X/(A + B X); & Y &= A e^{B X}; \\ Y &= A + B X^K; & Y &= A + B \ln(X); & Y &= A X^B. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Функції (2.37) не лише дозволяють описувати залежності різноманітного характеру, але й мають цілком визначену асимптотичну поведінку, що й робить їх зручними для практичного використання.

Параметри частини нелінійних функцій (2.37) можна підібрати в середовищі табличного процесора Excel, виконавши команду „вставити лінію тренда” на побудованій діаграмі типу „точечная” та вибравши відповідний вид функції. Параметри інших нелінійних функцій обчислюються згідно з методом найменших квадратів шляхом чисельної мінімізації суми квадратів відхилень дослідних точок від апроксимуючої функції. При використанні табличного процесора Excel необхідно для значень аргументу X , для яких наявні дослідні значення функції Y , обчислити значення апроксимуючої функції при початкових параметрах A , B , заданих в окремих комірках електронної таблиці. За допомогою функції $\text{СУММКВРАЗН}(\text{Масив_}Y(X), \text{Масив_}Y)$ обчислюється сума квадратів відхилень дослідних значень функції Y від апроксимуючих значень $Y(X)$. Далі слід скористатися інструментом Excel „поиск решения”, котрий реалізує підбір таких значень параметрів A , B , при яких сума квадратів відхилень буде мінімальною.

Таким же способом обчислюються параметри функції довільного виду, включаючи залежності однієї змінної від K аргументів: $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_K)$. Вид апроксимуючої функції обирається на основі досвіду, теоретичного та експериментального аналізу особливостей поведінки досліджуваного явища.

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – додаток Б

[8] – сторінки 174–185, 253–278

2.10 Приклад статистичної обробки вибірки випадкової величини

Із метою ілюстрації викладених методів статистичної обробки вибірок випадкових величин розглянемо приклад з такими вихідними даними.

Шляхом опитування групи з 20 студентів встановлено час, витрачений кожним із них на виконання курсової роботи. У результаті отримана вибірка обсягом $N=20$ значень витрат часу в годинах:

16	20	27	27	25	14	13	31	24	19
19	21	16	17	26	21	18	23	20	22

Обробка за описаною вище методикою дала наступні результати:

- розмах вибірки $X_{\min} = 13$ годин, $X_{\max} = 31$ година;
- середнє значення (2.17) $M = 20,95$ години;
- стандарт (2.18) $S = 4,73$ години;
- коефіцієнт варіації (2.19) $V = 0,226 = 22,6\%$.

Таким чином, на виконання курсової роботи різні студенти витрачали від 13 до 31 години, середні по групі витрати часу становили приблизно 21 годину, а коефіцієнт варіації дорівнює 22,6%.

Продовжуючи викладену процедуру статистичної обробки, будемо гістограму розподілу часу, витраченого студентами на виконання курсової роботи. При $N=20$ даних приймаємо 6 інтервалів, довжина яких згідно з формулою (2.20) дорівнює $d=(31-13)/6=3,0$ години. Встановивши межі інтервалів C_j кратними 3 годинам, отримуємо 7 інтервалів в межах від $C_0=12$ годин до $C_7=33$ години. Обчислення, необхідні для побудови гістограми розподілу, виконані в таблиці:

Номер інтервалу J	Кінець інтервалу C_j	N_j	P_j	f_j	f_{jt}
1	15	2	0,10	0,0333	0,0383
2	18	3	0,15	0,0500	0,0696
3	21	5	0,25	0,0833	0,0846
4	24	4	0,20	0,0667	0,0687
5	27	3	0,15	0,0500	0,0373
6	33	3	0,15	0,0250	0,0033

Оскільки до останнього, сьомого інтервалу потрапив усього один елемент вибірки, цей інтервал об'єднаний із шостим, довжина якого таким чином зросла до 6 годин. Обчислені за формулами (2.21) і (2.22) значення імовірності попадання P_j та густини розподілу f_j для кожного з шести інтервалів також наведені в таблиці.

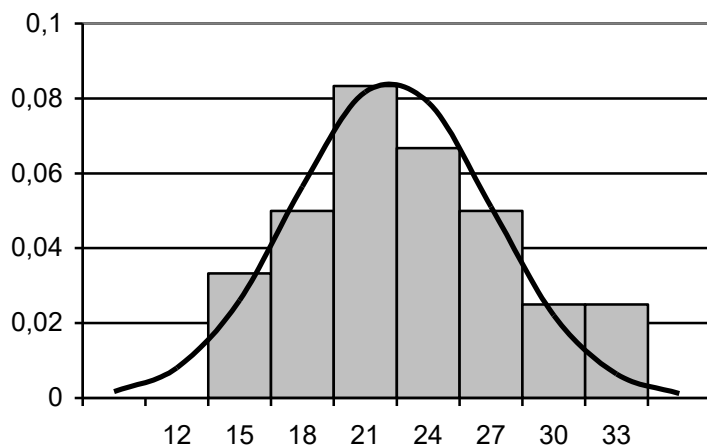


Рис. 2.5 Гістограма розподілу часу, витраченого на виконання курсової роботи

Графічне зображення гістограми збудоване на рисунку 2.5 за даними таблиці. Уздовж осі абсцис відкладені кінці інтервалів C_j , тобто значення самої випадкової величини, а вздовж осі ординат – обчислені за формулою (2.22) значення густини імовірності f_j .

Із рисунка 2.5 видно, що отримана гістограма має досить симетричний пагорбоподібний вигляд. Найімовірнішими є значення часу від 15 до 27 годин. Симетрична пагорбоподібна форма гістограми близька до форми густини нормального розподілу (2.8). Очевидна залежність витрат часу від великої кількості факторів впливу також підтверджує можливість застосування нормального розподілу для імовірнісного опису дослідженої випадкової величини.

Перевірка можливості використання нормального закону розподілу для опису випадкової величини витрат часу на виконання курсової роботи виконана за критерієм узгодженості Пірсона в наступній таблиці:

Номер інтервалу J	Кінець інтервалу C_j	P_j	$t = \frac{(x - M)}{S}$	$F_j(t)$	P_{jt}	χ^2
	12		-1,89	0,0294		
1	15	0,10	-1,26	0,1038	0,0744	0,176
2	18	0,15	-0,62	0,2676	0,1638	0,023
3	21	0,25	0,01	0,5040	0,2364	0,016
4	24	0,20	0,64	0,7389	0,2349	0,104
5	27	0,15	1,28	0,8997	0,1608	0,015
6	33	0,15	2,55	0,9946	0,0949	0,640
С у м и :		1,00			0,9652	0,974

Для кожного з шести інтервалів гістограми в колонках таблиці послідовно наведені: дослідні імовірності попадання до інтервалу P_j , нормовані значення t за формулою (2.9), значення функції нормального розподілу $F_j(t)$ для кінця інтервалу, встановлені за таблицею нормального розподілу А.1 або за функцією $(\text{НОРМРАСП}(x, M, S, 1))$, теоретична імовірність попадання до інтервалу P_{jt} , рівна різниці $F_j - F_{j-1}$, а також складова критерію Пірсона для j -того інтервалу за формулою (2.23). Сума значень останньої колонки дорівнює

статистиці критерію Пірсона $\chi^2=0,974$. За таблицею розподілу Пірсона А.2 для рівня значимості $\alpha=0,05$ та кількості ступенів свободи $k=6-3=3$ критичне значення критерію $\chi_{\text{кр}}^2=7,82$. Оскільки $\chi^2=0,974 < \chi_{\text{кр}}^2=7,82$, нормальний розподіл не суперечить дослідним даним і може використовуватися для імовірнісного опису витрат часу на виконання курсової роботи.

Отримані статистичні характеристики та закон розподілу дозволяють оцінити імовірності реалізації певних подій та встановити раціональну норму часу на виконання курсової роботи. Нехай навчальним планом на виконання курсової роботи відведено 24 години. Імовірність того, що студент витратить на виконання роботи не більше 24 годин, визначимо за формулою (2.29). Нормоване значення випадкової величини витрат часу (2.9) дорівнює $t = (x - M) / S = (24 - 20,95) / 4,73 = 0,645$. За таблицею нормального розподілу або за функцією Excel *НОРМРАСП(ln x, α, β, I)* визначаємо $F(0,645)=0,740$. Це означає, що у відведений термін із завданням справляться 74% студентів.

Згідно з вимогами до вищих навчальних закладів, абсолютна успішність повинна становити не менше ніж 90%. Отриманий результат 74% свідчить, що норма часу 24 години занижена і не відповідає здібностям реальних студентів та обсягу курсової роботи. Для забезпеченості $F=0,9$ за таблицею нормального розподілу визначимо $t=1,28$. Відповідна норма часу визначається як верхня межа випадкової величини витрат часу за функцією Excel *НОРМОБР(F, α, β)* або за (2.32): $X_{\text{max}} = M + t S = 20,95 + 1,28 \times 4,73 = 27,0$ год. Встановлення норми часу 27 годин забезпечить вчасне виконання курсової роботи 90% студентів.

Розділ 3

ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ НОРМУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ І ВПЛИВІВ
НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

3.1 Класифікація навантажень і впливів на будівельні конструкції

Взаємодія будівель, споруд і конструкцій з експлуатаційним середовищем реалізується через навантаження і впливи. Визначення та класифікація навантажень і впливів викладені в нормативних документах [1, 2].

Вплив – будь-яка причина, в результаті якої в конструкції змінюються внутрішні напруження, деформації або інші параметри стану. Впливи експлуатаційного середовища поділяють на:

- механічні, які враховуються в розрахунку безпосередньо та розглядаються як сукупність сил, прикладених до конструкції (**навантаження**), або як вимушені переміщення і деформації елементів конструкції;
- впливи немеханічної природи (наприклад, впливи агресивного середовища), зазвичай враховуються в розрахунку опосередковано.

Залежно від причини виникнення впливи поділяють на:

- **основні**, які є неминучими наслідками природних явищ чи людської діяльності;
- **аварійні**, які є небажаними результатами людської діяльності (грубі помилки), результатами несприятливого збігу обставин чи дуже рідкісними впливами природного походження (смерчі, цунамі тощо).

Окрім причин виникнення, навантаження і впливи на будівельні конструкції класифікують за мінливістю в часі та тривалістю дії, способом прикладення та реакцією конструкцій, як це відображено в таблиці 3.1.

Основою для визначення навантажень є їхні **характеристичні значення**, тобто базові значення навантаження, встановлені в нормах [2]. Характеристичні значення постійних і змінних тривалих навантажень зазвичай дорівнюють їх середнім значенням. Характеристичні значення змінних короткочасних навантажень приймають такими, що можуть перевищуватися один раз на 50 років, що близько до звичайних термінів експлуатації будівель і споруд.

Розрахункові значення навантажень, які безпосередньо враховуються при проектуванні конструкцій, визначають за формулами виду (1.11) шляхом множення характеристичних значень на коефіцієнти надійності за навантаженням γ_f , залежний від виду навантаження та виду розрахункового значення, та на інші коефіцієнти, що враховують особливості взаємодії навантаження з конструкцією. Характеристичні значення різних навантажень і відповідні коефіцієнти надійності γ_f встановлені в ДБН В.1.2-2:2006 "Навантаження і впливи" [2].

Таблиця 3.1 Класифікація навантажень і впливів

Ознаки класифікації	Визначення понять	Приклади
Причини виникнення	основні навантаження – неминучі наслідки природних явищ або людської діяльності	власна вага конструкцій, снігове, вітрове, ожеледне, кранове навантаження
	аварійні навантаження – небажані результати людської діяльності (грубі помилки), несприятливого збігу обставин, або дуже рідкісні впливи природного походження (смерчі, цунамі тощо)	вибухи, аварії промислового обладнання, зсув ґрунту, землетрус непередбаченої сили
Мінливість у часі	постійні – діють, практично не змінюючись протягом усього терміну експлуатації споруди, для яких можна нехтувати зміною у часі відносно середнього	вага частин споруд та ґрунтів, гірничий тиск, зусилля попереднього напруження конструкцій
	змінні – для них не можна нехтувати зміною у часі відносно середнього	снігове, вітрове, ожеледне, кранове навантаження
Тривалість дії змінних навантажень	тривалі – тривалість дії наближається до встановленого терміну експлуатації конструкції	вага тимчасових перегородок, стаціонарного обладнання та його заповнення; тиск у ємкостях та трубопроводах; навантаження від матеріалів і стелажів у складах, архівах, сховищах; короткочасні навантаження з квазіпостійними розрахунковими значеннями
	короткочасні – реалізуються багато разів протягом терміну експлуатації споруди при тривалості дії значно меншій за встановлений термін експлуатації конструкції	навантаження від устаткування в перехідних режимах, при ремонтах; навантаження на перекриття від людей, тварин, виробничого і транспортного обладнання; кліматичні навантаження і впливи з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями
	епізодичні – реалізуються дуже рідко (один чи декілька разів протягом терміну експлуатації споруди) при тривалості дії незрівнянно малій порівняно з терміном експлуатації	сейсмічні та вибухові впливи; різкі порушення технологічного процесу та аварії обладнання; деформації просадкових ґрунтів, осідання в зонах гірничих виробок і карстових районах.
Спосіб прикладення	фіксовані – схема прикладення не змінюється в часі	вітер, сніг, вага конструкцій та обладнання
	вільні – з часом переміщуються по конструкції	мостові та підвісні крани, інший технологічний транспорт
Реакція конструкцій	статичні – не викликають динамічних реакцій в конструкціях	вітер на звичайні будівлі, сніг, вага конструкцій та обладнання
	динамічні – викликають динамічні реакції в конструкціях	вітер на висотні будівлі та споруди, виробниче та кранове обладнання

Наведена в таблиці 3.1 класифікація навантажень і впливів значною мірою впливає на особливості їх урахування при розрахунках конструкцій. Так наприклад, від тривалості дії навантаження (постійне, змінне тривале, короткочасне чи епізодичне) залежить перелік його розрахункових значень, особливості урахування спільної дії з іншими навантаженнями, необхідність розгляду тих чи інших розрахункових ситуацій. Значну роль відіграє також взаємодія навантаження з конкретною конструкцією. Наприклад, вітрове навантаження на звичайну будівлю з високою частотою власних коливань розглядається як статичне, а при його дії на висотну споруду можуть виникати динамічні ефекти внаслідок близькості частоти власних коливань споруди до частоти поривів вітрового потоку.

Навантажувальним ефектом називають зусилля, напруження, деформації, переміщення, розкриття тріщин та інші механічні параметри стану конструкції, які викликаються зовнішніми впливами на неї. Навантажувальні ефекти в кожному елементі чи перерізі конструкції визначаються методами будівельної механіки та опору матеріалів.

Спільна дія навантажень, які одночасно впливають на об'єкт розрахунку, враховується шляхом додавання навантажувальних ефектів від дії цих навантажень з урахуванням їх несприятливого сполучення. Знижена імовірність одночасної дії декількох випадкових навантажень враховується коефіцієнтами сполучення $\psi \leq 1$, які зменшують сумарний навантажувальний ефект. Як правило, при урахуванні різнорідних навантажень з різними схемами прикладення до конструкції суму навантажувальних ефектів від їх дії порівнюють її з певними допустимими величинами методу граничних станів: розрахунковим опором матеріалу, несучою здатністю стержня, допустимою величиною прогину чи розкриття тріщин тощо.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – розділ 3, підрозділ 6.5
- [2] – розділ 4, додаток Б
- [3] – підрозділи 1.1, 1.2, 1.5, 1.6

3.2 Види розрахункових значень навантажень і впливів на будівельні конструкції

Основою для встановлення розрахункових величин навантажень і впливів на будівельні конструкції є характеристичні значення, описані в попередньому підрозділі. З метою безпосереднього урахування в розрахунках несучих конструкцій для кожного з основних навантажень і впливів встановлено два головних розрахункових значення: експлуатаційне й граничне. За необхідності

можуть також встановлюватися циклічне та квазіпостійне розрахункові значення. Для аварійних навантажень і впливів встановлюється лише граничне розрахункове значення. Суть названих розрахункових значень коротко викладена в таблиці 3.2 та детальніше роз'яснена в коментарях після неї.

Таблиця 3.2 Класифікація розрахункових значень навантажень і впливів

Розрахункові значення	В и з н а ч е н н я п о н я т ь	Використання в розрахунках
Граничне	відповідає екстремальній ситуації, яка може виникнути не більше одного разу протягом терміну експлуатації конструкції, і дорівнює значенню, що може перевищуватися один раз на протязі Т років	Перевірка граничних станів першої групи, а також другої групи, якщо вихід за граничний стан може бути допущений у середньому один раз у Т років
Експлуатаційне	характеризує умови нормальної експлуатації конструкції і дорівнює значенню, яке може перевищуватися протягом певної частки η встановленого терміну експлуатації.	Перевірка граничних станів другої групи, якщо вихід за граничний стан може бути допущений протягом заданої частки η терміну експлуатації
Квазіпостійне	дорівнює значенню постійного навантаження, еквівалентного за результуючою дією до реального випадкового процесу навантаження.	Урахування реологічних процесів при дії змінних навантажень (повзучість матеріалів, втрати попереднього напруження тощо)
Циклічне	задає гармонійний процес, еквівалентний за результуючою дією реальному випадковому процесу змінного навантаження	Розрахунки на витривалість при повторній дії циклічних змінних навантажень

Кожне навантаження чи вплив має характеристичне значення та від одного до чотирьох розрахункових значень. Необхідність встановлення розрахункових значень різних видів обумовлюється властивостями конкретного навантаження, характером його взаємодії з конструкціями певного класу (наприклад, здатність викликати динамічні ефекти) та завданнями розрахунку, відображеними в таблиці 3.2.

Граничні розрахункові значення навантажень використовуються в розрахунках несучої здатності за граничними станами першої групи, вихід за які по суті означає руйнування конструкції. Оскільки перше ж перевищення випадковим процесом навантаження його граничного розрахункового значення може призвести до повної і необоротної відмови конструкції, в якості граничних розрахункових значень використовують максимуми навантаження, які можуть перевищуватися лише один раз протягом встановленого терміну експлуатації конструкції, будівлі чи споруди.

Експлуатаційні розрахункові значення навантажень використовуються для перевірки граничних станів другої групи, вихід за які утруднює експлуатацію будівлі чи конструкції, але не призводить до її руйнування. Тому експлуатаційні розрахункові значення встановлюють залежно від часу (частки

терміну експлуатації), протягом якого допускається вихід за межі другого граничного стану. Як правило, наступне зменшення навантаження чи впливу обумовлює відновлення справного стану конструкції, тому перевищення норми прогину, допустимої амплітуди коливань чи допустимої величини розкриття тріщин у залізобетонних конструкціях може відбуватися декілька разів у процесі експлуатації конструкції. Важливим є сумарний час перебування конструкції за межами другого граничного стану.

Квазіпостійні розрахункові значення навантажень використовуються при урахуванні тривалих реологічних процесів типу усадки бетону під навантаженням чи втрати попереднього напруження арматури в залізобетонних конструкціях. По суті квазіпостійне розрахункове значення є спрощеною моделлю, яка принципово полегшує аналіз реологічних процесів, замінюючи дію реального випадкового процесу дією постійного в часі навантаження.

Циклічні розрахункові значення навантажень також є спрощеною моделлю, яка використовується для розрахунків несучих конструкцій на витривалість при повторній дії змінних навантажень. Циклічне розрахункове значення задається трьома величинами, які визначають синусоїдальну функцію зміни навантаження в часі: максимальне значення, мінімальне значення, частота або період синусоїди.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – розділ 3, підрозділ 7.2
- [2] – розділ 4, додаток Б
- [3] – підрозділи 1.1, 1.2, 1.5

3.3 Принципи нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції

Розрахунки будівельних конструкцій за методом граничних станів зводяться до порівняння зовнішніх навантажень чи впливів експлуатаційного середовища, що діють на конструкцію, зі здатністю конструкції чинити опір цим навантаженням і впливам. Для виконання таких розрахунків необхідно обґрунтовано встановити розрахункові значення навантажень і впливів, які відображаються в нормах навантажень [2] і таким чином стають обов'язковими для використання при проектуванні.

Важливість дослідження навантажень і впливів обумовлена тим, що вони є найбільш мінливими та найменш дослідженими випадковими факторами, які впливають на роботу будівельних конструкцій. Практично немає навантажень, що не є випадковими, або мають малу мінливість, якою можна знехтувати.

Випадкова природа навантажень і впливів на будівлі, споруди та конструкції обумовлює необхідність використання імовірнісних методів для їх нормування. Принципи імовірнісної методології нормування навантажень закладені в роботах О.О. Бать, В.А. Балдіна, В.В. Болотіна, В.А. Отставнова, М.С. Стрелецького та розвинуті в працях українських вчених [3, 10, 11, 12]. Глибокий імовірнісний аналіз навантажень, формування й обробка великих баз даних з атмосферних навантажень дозволили не лише розробити загальну методологію нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції, але й одержати практичні результати та створити норми навантажень України [2].

Характеристичні та розрахункові значення навантажень і впливів усіх видів визначаються методами теорії надійності, виходячи із заданої імовірності їх реалізації або інших імовірнісних характеристик. Для цього необхідно виконати операції, об'єднані загальним поняттям “нормування навантажень”:

- зібрати достатній обсяг статистичних даних про фактично реалізовані в минулому значення навантаження;
- на основі статистичного аналізу даних обрати імовірнісну модель, яка досить точно відображає основні властивості даного навантаження;
- обґрунтувати можливість застосування обраної імовірнісної моделі та визначити її параметри шляхом статистичної обробки наявних даних;
- обчислити характеристичні та розрахункові значення навантаження з використанням обґрунтованої імовірнісної моделі;
- виконати узагальнення отриманих розрахункових значень і розробити спосіб подання дослідженого навантаження в нормах [2] який забезпечує достатньо точну, однозначну й максимально просту процедуру визначення навантаження при розрахунках будівельних конструкцій.

Важливу роль у процесі нормування навантажень і впливів відіграє вибір і обґрунтування імовірнісної моделі, вид якої може істотно вплинути на отримані результати.

Для імовірнісного опису постійних та змінних тривалих навантажень використовується модель випадкової величини з нормальним розподілом (2.8). Таке імовірнісне подання відповідає суті постійного навантаження, випадкове значення якого реалізується в результаті спорудження об'єкта і практично не змінюється в процесі його експлуатації. Характеристичне значення постійного навантаження приймається рівним його середньому значенню за результатами статистичного дослідження або номінальному значенню за паспортними даними чи робочими кресленнями. Експлуатаційне розрахункове значення дорівнює характеристичному, а граничне розрахункове значення постійного навантаження визначаються з використанням таблиць нормального розподілу та формул (2.32) для заданого рівня забезпеченості. Норми [1] вимагають

приймати забезпеченість граничного розрахункового значення постійного навантаження рівною 0,995. Реальні рівні забезпеченості розрахункових значень постійного навантаження, визначених за нормами [1], є дещо меншими і становлять 0,95...0,99, що обумовлено завищеною мінливістю розмірів реальних конструкцій.

При статистичних дослідженнях змінних навантажень і впливів використовуються імовірнісні моделі випадкових процесів різного виду, які в явному вигляді враховують випадкові зміни в часі та частотну структуру навантаження. Як приклад, можна відмітити застосування моделей випадкових процесів для подання снігового, вітрового та кранового навантажень. Загальні методи та конкретні методики встановлення розрахункових значень змінних навантажень розглянуті в наступному підрозділі та в розділі 5.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – підрозділ 7.2
- [3] – підрозділи 1.3, 1.4
- [10] – підрозділи 1.2, 1.3

3.4 Загальні методи визначення розрахункових значень змінних навантажень і впливів

Принципи визначення граничного та експлуатаційного розрахункових значень змінних навантажень пояснені на рисунку 3.1, де зображена реалізація випадкового процесу змінного навантаження. При встановленні граничного розрахункового значення враховується кількість (частота) відмічених випадків його перевищення протягом терміну експлуатації конструкції. На рисунку 3.1 зображено три випадки перевищення розрахункового значення, відміченого горизонтальною лінією. Середня відстань в часі між такими випадками дорівнює періоду повторюваності граничного розрахункового значення T . Зменшення розрахункового значення приведе до появи нових випадків його перевищення та відповідного зменшення T , а підвищення розрахункового значення – навпаки зменшить кількість перевищень і збільшить період T .

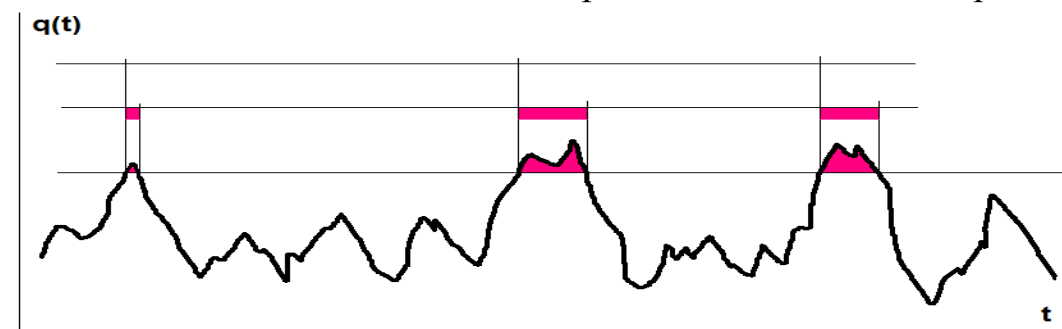


Рис. 3.1 Реалізація випадкового процесу змінного навантаження

Експлуатаційне розрахункове значення встановлюється з урахуванням сумарної тривалості його перевищення реальним випадковим процесом змінного навантаження $q(t)$ і використовується при перевірці граничних станів другої групи. З рисунка 3.1 можна зрозуміти, що збільшення розрахункового значення (підйом горизонтальної лінії, що відповідає розрахунковому значенню, догори) призведе до зменшення сумарної тривалості його перевищення. Експлуатаційне розрахункове значення потрібно встановити таким, щоб сумарна тривалість його перевищення дорівнювала заданій частці встановленого терміну експлуатації конструкції. Наприклад, частка терміну експлуатації 0,02 означає, що умови другого граничного стану можуть не виконуватися протягом 2% терміну експлуатації конструкції.

Використання імовірнісних моделей випадкових процесів забезпечує адекватне відображення реальних процесів навантаження, але приводить до складних обчислювальних процедур. Опис у формі випадкових полів є ще складнішим, а тому рідко використовується при нормування навантажень.

Компромісним варіантом між простотою та необхідністю урахування фактору часу є імовірнісна модель послідовності максимальних значень навантаження за характерні проміжки часу. Для її розробки реалізація процесу навантаження розділяється на рівні відрізки (рік, місяць, доба тощо), як це показано на рисунку 3.2. Обрана довжина часового інтервалу Δt повинна забезпечувати незалежність ординат, віддалених на цей інтервал. На кожному інтервалі вибирається максимальне значення ординати і таким чином формується послідовність максимумів, яку можна вважати вибіркою незалежних даних. Завдяки рівномірності поділу на інтервали, послідовність максимумів несе інформацію про частотну структуру процесу навантаження.

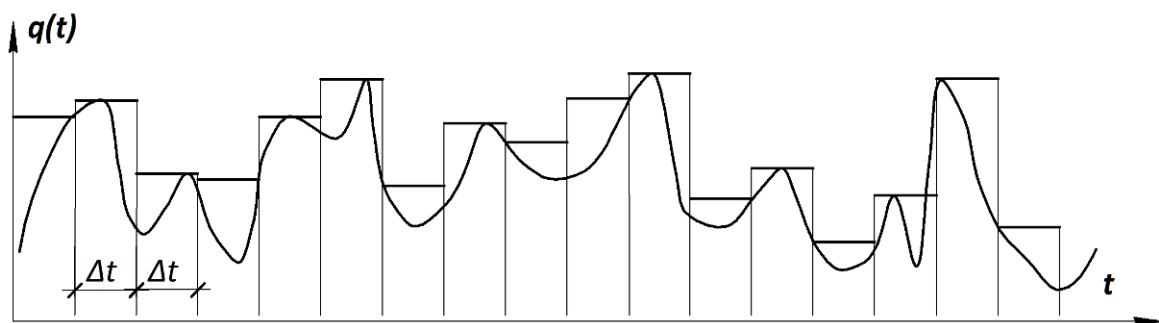


Рис. 3.2 Схема формування послідовності максимальних значень змінного навантаження

Як правило, отримана вибірка максимумів описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля (2.15). Граничне розрахункове значення навантаження, що відповідає середньому періоду повторюваності T , обчислюється за формулою (2.31). Описана імовірнісна модель послідовності максимальних значень широко використовується при нормуванні змінних

навантажень завдяки своїй простоті та можливості явного урахування часу, але вона придатна лише для обчислення граничних розрахункових значень змінних навантажень, які можуть перевищуватися в середньому один раз на T років, у тому числі характеристичних значень з періодом повторюваності $T=50$ років.

Принципова схема встановлення квазіпостійного розрахункового значення змінного короточасного навантаження зображена на рисунку 3.3. Розрахункове значення Q_p встановлюється таким, щоб ефект від його безперервної дії протягом терміну експлуатації (наприклад, величина відносної деформації повзучості бетону) дорівнював ефекту від дії реального випадкового процесу змінного навантаження. Як правило, для його визначення необхідно розглядати реальний реологічний процес накопичення змін певної характеристики матеріалу при дії випадкового процесу. Після цього встановлюється значення Q_p з умови рівності накопичених змін цієї характеристики. Ця досить складна задача зазвичай розв'язується чисельними методами. Слід відмітити, що квазіпостійне розрахункове значення обумовлюється режимом навантаження та матеріалом конструкції і не залежить від терміну експлуатації.

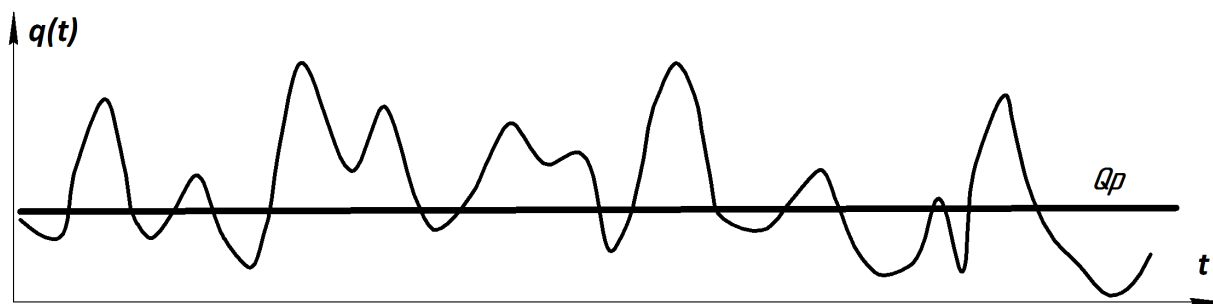


Рис. 3.4 Схема встановлення квазіпостійного розрахункового значення змінного навантаження

Циклічне розрахункове значення встановлюється як синусоїда, вплив якої на витривалість конструкцій еквівалентний впливу реального випадкового процесу короточасного змінного навантаження. Для її визначення необхідно задати три величини: максимальне значення X_{\max} , мінімальне значення X_{\min} та частоту або період синусоїди T_e . Ці величини потрібно задати такими, що синусоїда наближено "вписувалася" у фактичну реалізацію випадкового процесу навантаження, як це показано на рисунку 3.4. Результати досліджень показують, що в якості максимального та мінімального значень синусоїди доцільно прийняти середні значення усіх поточних максимумів та мінімумів випадкового процесу навантаження, а частоту синусоїди прирівняти до ефективної (середньозваженої) частоти цього процесу. Циклічне розрахункове значення є характеристикою режиму навантаження і не залежить від терміну експлуатації та матеріалу конструкції.

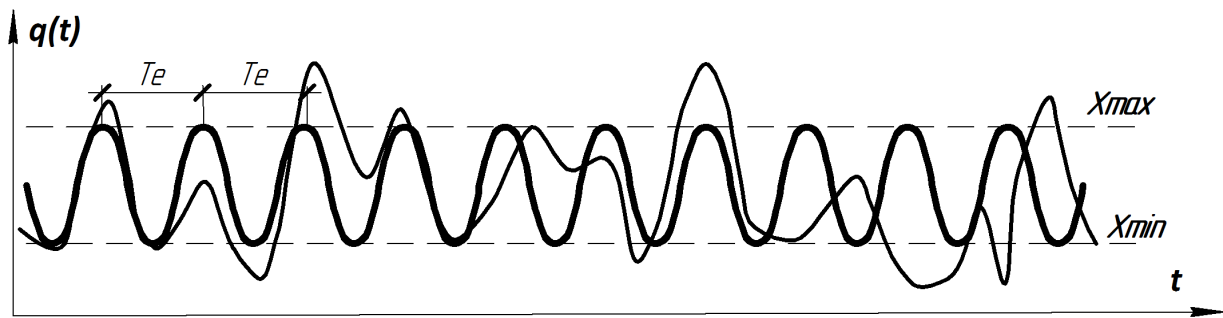


Рис. 3.4 Схема встановлення циклічного розрахункового значення змінного навантаження

Необхідність встановлення квазіпостійних та циклічних розрахункових значень встановлюється, виходячи з властивостей і характеристик кожного конкретного змінного навантаження. Наприклад, для снігового навантаження не встановлене циклічне розрахункове значення, оскільки частота період його зміни наближається до одного року, а така мала кількість циклів навантаження не може вплинути на витривалість несучих конструкцій. Для вітрового навантаження не нормується квазіпостійне розрахункове значення унаслідок його практичної близькості до нуля.

Викладені вище загальні принципи і методи встановлення розрахункових значень змінних навантажень і впливів конкретизуються по відношенню до кожного навантаження чи впливу шляхом вибору імовірнісної моделі, яка адекватно відображає його властивості, та розроблення формул чи алгоритмів обчислення, що відповідають обраній моделі.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – підрозділ 7.2
- [3] – підрозділи 1.3, 1.4
- [10] – підрозділи 1.3, 1.4

3.5 Дослідження спільної дії випадкових навантажень на несучі будівельні конструкції

На будівельні конструкції у переважній більшості випадків одночасно діють декілька навантажень, кожне з яких представлене розрахунковим, тобто максимальним значенням з деякою допустимою імовірністю, частотою чи тривалістю перевищення. Визначення сумарного навантажувального ефекту (зусилля в елементі чи напруження в перерізі) шляхом простого додавання навантажувальних ефектів має на увазі одночасну реалізацію розрахункових значень усіх діючих навантажень. Відсутність значимого зв'язку між діючими навантаженнями обумовлює малу імовірність такої події. Наочним

підтвердженням цього факту є рисунок 3.5, на якому зображені реалізації випадкових процесів навантажувальних ефектів $N(t)$ від двох одночасно діючих змінних навантажень. Якщо одне з них приймає максимальне значення, то інше в цей час зазвичай є помітно меншим, ближчим до середнього значення.

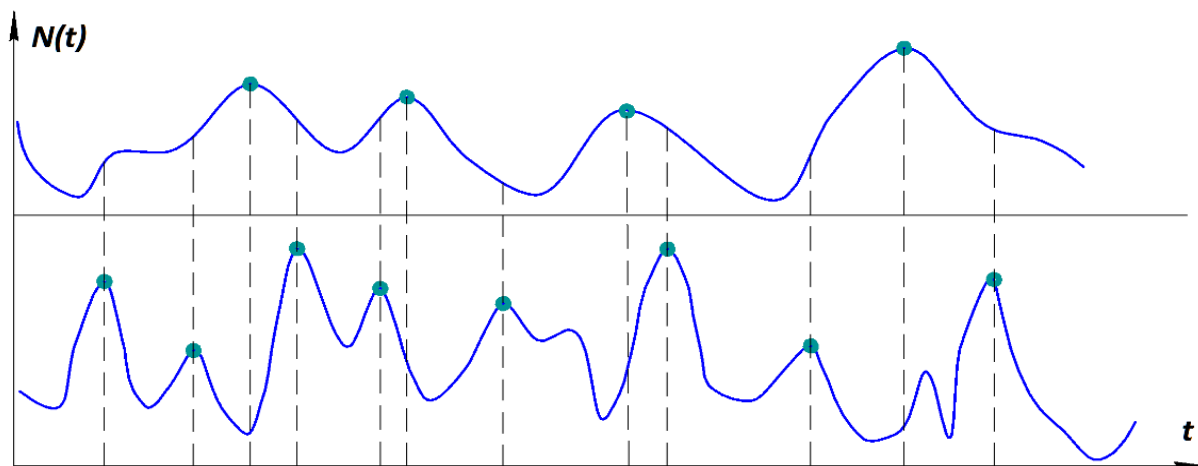


Рис. 3.5 Реалізації випадкових процесів навантажувальних ефектів

Згідно з основними положеннями методу граничних станів, ефект сполучення навантажень при визначенні сумарного розрахункового значення N_m враховується шляхом множення суми навантажувальних ефектів від дії їх розрахункових значень Q_{mi} на коефіцієнт сполучення ψ :

$$N_m = \psi \sum_i (\alpha_i Q_{mi}). \quad (3.1)$$

В якості простого наочного прикладу розглянемо сукупність незалежних нормально розподілених випадкових величин навантажень, кожне з яких задане математичним сподіванням M_i та стандартом S_i . Перехід до навантажувального ефекту (зусилля в елементі чи напруження в перерізі) здійснюється шляхом множення кожного з навантажень на власний коефіцієнт впливу α_i .

Розрахункові значення кожного з навантажень визначають за формулою

$$Q_{mi} = M_i + t_p S_i, \quad (3.2)$$

де t_p – аргумент функції нормального розподілу за таблицею [8], що відповідає заданій забезпеченості розрахункового значення P .

Згідно з теоремами про числові характеристики суми незалежних випадкових величин [8], математичне сподівання й стандарт випадкової величини сумарного навантажувального ефекту дорівнюють

$$M = \sum_{i=1}^N (\alpha_i M_i); \quad S = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_i S_i)^2}. \quad (3.3)$$

Наявність числових характеристик (3.3) дозволяє визначити розрахункове значення сумарного навантажувального ефекту за формулою, аналогічною (3.2) при тій же забезпеченості P :

$$N_m = M + t_p S. \quad (3.4)$$

Тоді виходячи з формули (3.1), коефіцієнт сполучення дорівнює

$$\psi = N_m / \sum_i (\alpha_i Q_{mi}). \quad (3.5)$$

З формули (3.3) очевидно, що стандарт сумарного навантажувального ефекту завжди менший від суми стандартів ефектів від окремих навантажень. Тому розрахункове значення сумарного навантажувального ефекту буде меншим від суми розрахункових значень ефектів від окремих навантажень, а коефіцієнт сполучення (3.5) не перевищуватиме одиниці.

Аналіз формул (3.2) – (3.5) вказує на те, що коефіцієнт сполучення залежить від статистичних характеристик M_i , S_i та коефіцієнтів впливу діючих навантажень α_i . Отже, при дії певного комплексу навантажень для кожного елемента й перерізу конструкції будуть отримані різні коефіцієнти сполучення, залежні від комбінації коефіцієнтів впливу навантажень.

В якості наочного прикладу визначимо коефіцієнти сполучення двох навантажень з такими статистичними характеристиками: $M_1=10$, $S_1=3$ і $M_2=10$, $S_2=1$. При забезпеченості розрахункових значень $P=0,99$ згідно з таблицями нормального розподілу [8] $t_p=2,32$, що дає розрахункові значення навантажень за формулою (3.2) $Q_1=16,96$ і $Q_2=12,32$. Коефіцієнти впливу визначається таким чином, щоб частка першого навантаження у складі суми зусиль в елементі, завжди рівної 100, змінювалася в межах від $C_1=0$ до $C_1=1$:

$$\alpha_1 = 100 C_1 / Q_1, \quad \alpha_2 = 100(1 - C_1) / Q_2. \quad (3.6)$$

З використанням формул (3.2) – (3.6) обчислені коефіцієнти сполучення зусиль для різних часток навантажень у складі сумарного зусилля. Результати обчислень наведені на рисунку 3.6.

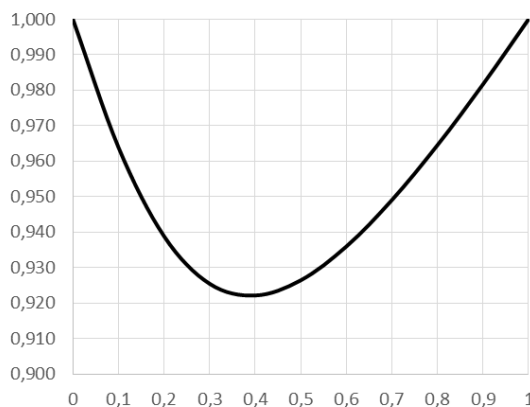


Рис. 3.6 Коефіцієнти сполучення двох навантажень (модельний приклад)

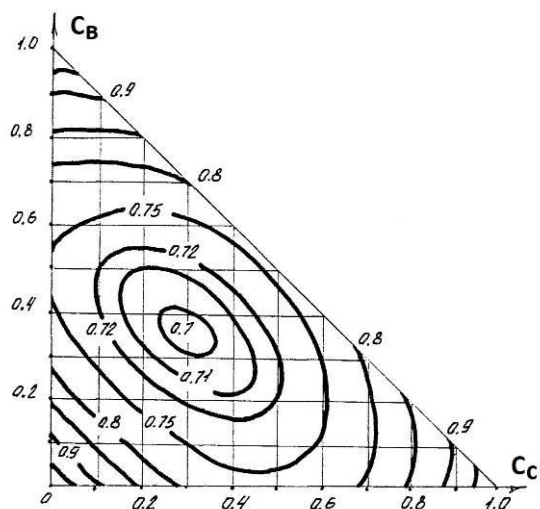


Рис. 3.7 Коефіцієнти сполучення навантажень від снігу, вітру та мостових кранів

На рисунку 3.6 уздовж осі абсцис відкладені значення частки першого навантаження C_1 , а вздовж осі ординат – отримані значення коефіцієнтів сполучення (3.5). З рисунка видно, що коефіцієнти сполучення змінюються від $\psi=1,00$ при урахуванні лише одного навантаження ($C_1=0$ або $C_2=0$) до мінімального значення $\psi=0,92$ при $C_1=0,4$, тобто при близьких частках навантажень у складі сумарного зусилля. Розрахунки з іншими значеннями числових характеристик навантажень показали, що зростання коефіцієнтів варіації навантажень призводить до зменшення коефіцієнтів сполучення. Реальні залежності коефіцієнтів сполучення кліматичних і кранових навантажень, опубліковані в [3, 6] мають вигляд, подібний до рисунка 3.6 при мінімальних значеннях 0,75 – 0,80.

В роботах [3, 6, 10] наведені результати дослідження коефіцієнтів сполучення навантажень від снігу, вітру та мостових кранів, що діють на конструкції каркасів одноповерхових промислових будівель. Обчислення виконані за викладеними вище принципами, але на основі використання імовірнісних моделей квазістаціонарних випадкових процесів для подання навантажень. Результати обчислень за даними окремих метеостанцій та узагальнення по території України представлені на рисунку 3.7 у формі залежності коефіцієнта сполучення від часток діючих навантажень, яка утворює провисаючу поверхню. Мінімальне значення коефіцієнта сполучення трьох навантажень отримане рівним близько 0,7. Залежності, подібні до рисунка 3.5, запропоновано описувати формулою виду

$$\psi = \frac{C_C}{C_C(1-B_C)+B_C} + \frac{C_B}{C_B(1-B_B)+B_B} + \frac{C_K}{C_K(1-B_K)+B_K}, \quad (3.7)$$

де C_C , C_B і C_K – частки зусиль чи крайових напружень в конструкції від дії снігового, вітрового і кранового навантаження;

B_C , B_B і B_K – коефіцієнти апроксимації, що враховують імовірнісні властивості діючих навантажень.

За результатами проведених досліджень отримані й наведені в [3, 6] значення коефіцієнтів B_C , B_B і B_K апроксимуючої формули (3.7), придатні для усієї території України. Формула (3.7) рекомендується для використання в перевіірочних розрахунках існуючих конструкцій, відомі перерізи яких дозволяють оцінити частки діючих навантажень у складі сумарного зусилля.

Рекомендовані джерела інформації:

- [3] – сторінки 21 – 26
- [5] – практичне заняття № 9
- [10] – сторінки 139 – 145
- [13] – сторінки 49 – 53

3.6 Порядок урахування спільної дії навантажень в нормах проектування

Правила урахування спільної навантажень викладені в пунктах 4.15 – 4.20 ДБН В.1.2-2:2006 [2]. Чинні норми навантажень передбачають розгляд декількох варіантів сполучень, до яких включають навантаження, що найбільш несприятливо впливають на конструкції з точки зору певного граничного стану. При цьому слід дотримуватися логіки взаємодії навантажень. Так наприклад, завжди враховується постійне навантаження від ваги конструкцій, без якого будівля не може існувати; бічні сили мостових кранів не враховують без їх вертикального тиску; не можна одночасно враховувати дію вітру з різних сторін будівлі тощо. Окрім того, при виборі сполучень деякі спільно діючі змінні навантаження відповідно до вказівок пункту 4.19 ДБН [2] слід вважати одним змінним навантаженням.

В розрахунках використовують сполучення навантажень трьох типів:

- основні сполучення для перевірки граничних станів першої групи включають постійні навантаження з граничними розрахунковими значеннями, а також граничні розрахункові, циклічні або квазіпостійні значення змінних навантажень;
- основні сполучення для перевірки граничних станів другої групи включають постійні навантаження з експлуатаційними розрахунковими значеннями, а також експлуатаційні розрахункові, циклічні або квазіпостійні значення змінних навантажень;
- аварійні сполучення включають граничні розрахункові значення постійних і змінних навантажень та один епізодичний (аварійний) вплив.

При простих видах деформацій, коли в елементі чи перерізі конструкції діє внутрішнє зусилля одного виду (поздовжня сила чи згинальний момент), сполучення навантажень складають таким чином, щоб виявити найбільші можливі зусилля обох знаків, наприклад найбільший можливий стиск і найбільший можливий розтяг у кожному стержні ферми. При дії внутрішніх зусиль декількох видів (наприклад, поздовжня сила і згинальний момент у позацентрово стиснутій колоні) складають сполучення навантажень у яких виявляються максимальні значення зусилля одного виду та відповідні їм зусилля іншого виду. Так наприклад, для позацентрово стиснутої колони поперечної рами каркаса будівлі зазвичай розглядають такі комбінації зусиль:

$$+M_{\max} \text{ і } N; \quad -M_{\max} \text{ і } N; \quad N_{\max} \text{ і } +M; \quad N_{\max} \text{ і } -M.$$

Вказані комбінації зусиль складаються у двох варіантах, що відрізняються значеннями коефіцієнтів сполучення: при урахуванні одного та при урахуванні декількох змінних навантажень.

Сумарне зусилля (навантажувальний ефект) кожного виду в кожному сполученні навантажень обчислюється за формулою

$$N = N_{\Pi} + \psi_T \sum N_T + \psi_K \sum N_K + N_A, \quad (3.8)$$

де N_{Π} , N_T , N_K , N_A – зусилля від дії розрахункових значень постійного, змінних тривалих, змінних короточасних та аварійного навантаження.

Мала імовірність одночасної реалізації розрахункових значень цих навантажень урахується коефіцієнтами сполучення, рівними:

$\psi_T=1,00$ і $\psi_K=1,00$ – при урахуванні лише одного змінного навантаження в основному сполученні;

$\psi_T=0,95$ і $\psi_K=0,90$ – при урахуванні декількох змінних навантажень в основному сполученні;

$\psi_T=0,95$ і $\psi_K=0,80$ – при урахуванні декількох змінних навантажень в аварійному сполученні з одним епізодичним впливом.

У випадку, коли постійне навантаження зменшує зусилля в конструкції (наприклад при розрахунку анкерних болтів), його граничне розрахункове значення приймається з коефіцієнтом надійності, меншим за одиницю.

Наведені в ДБН [2] коефіцієнти сполучення в ряді випадків можуть бути завищеними, на що вказують викладені в попередньому питанні результати дослідження спільної дії навантажень від снігу, вітру і мостових кранів. При перевірочних розрахунках несучих конструкцій, коли перерізи усіх елементів відомі і дозволяють оцінити частку кожного з навантажень у складі сумарного зусилля чи напруження в перерізі, можна використати уточнені значення коефіцієнтів сполучення, які в ДБН 362-93 [6] рекомендовано визначати за формулою (3.7) з коефіцієнтами $B_C=1,56$; $B_B=1,69$; $B_K=1,66$.

Частки зусиль в елементі чи крайових напружень в перерізі конструкції C_C , C_B і C_K визначаються за формулами

$$C_C = \frac{N_C}{N_C + N_B + N_K}; \quad C_B = \frac{N_B}{N_C + N_B + N_K}; \quad C_K = \frac{N_K}{N_C + N_B + N_K}, \quad (3.9)$$

де N_C , N_B і N_K – зусилля в елементі чи крайові напруження в перерізі конструкції від дії снігового, вітрового і кранового навантаження.

При використанні коефіцієнтів сполучення (3.9) сумарне зусилля в елементі чи крайові напруження в перерізі від дії постійного, снігового, вітрового та кранового навантажень визначаються за формулою з ДБН [6]

$$N = N_{\Pi} + \psi (N_C + N_B + N_K), \quad (3.10)$$

яка в ряді випадків (при близьких значеннях часток зусиль від дії усіх змінних навантажень) забезпечує істотне зменшення сумарного навантажувального ефекту порівняно з розрахунком за ДБН [2].

Загальноєвропейські норми проектування (Єврокоди, EN) передбачають визначення сумарних зусиль в конструкціях з урахуванням роздільних коефіцієнтів сполучення згідно з принциповою формулою:

$$N = N_{II} + \sum (\psi_i N_i), \quad (3.11)$$

де N_{II} , N_i – зусилля від дії розрахункових значень постійного, змінних та аварійних навантажень;

ψ_i – коефіцієнти сполучення, притаманні кожному з врахованих змінних та аварійних навантажень.

При цьому також розглядають декілька сполучень навантажень, які враховують різні розрахункові ситуації, різні види розрахункових значень змінних навантажень та особливості конструкцій. Загалом підхід EN до урахування спільної дії навантажень вимагає розгляду значної кількості розрахункових параметрів, проведення обчислень у декількох варіантах та вибору найнебезпечнішої комбінації навантажень за їх результатами, а тому є складнішим від правил ДБН В.1.2-2:2006.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – підрозділ 7.3

[2] – пункти 4.15 – 4.20

[3] – сторінки 441 – 447, 457 – 460

Розділ 4

ПОСТІЙНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

4.1 Дослідження та нормування постійних навантажень від власної ваги конструкцій

Постійними вважають навантаження, які діють протягом усього терміну експлуатації об'єкта і значення яких практично не змінюються в часі. До них належать навантаження від ваги частин споруд, ваги ґрунтів, гірничий тиск, зусилля попереднього напруження конструкцій. Для постійних навантажень досить визначити два розрахункових значення: експлуатаційне і граничне.

Випадковий характер постійного навантаження від ваги конструкцій обумовлений статистичною мінливістю розмірів конструкцій та густини матеріалів. Зміни навантаження внаслідок ремонтів є незначними і можуть не враховуватися. Зростання навантаження при насиченні ізолюючих шарів вологою враховують шляхом встановлення густини матеріалів, що відповідає їх рівноважній вологості в процесі експлуатації. Пряме замочування водою розглядається як аварійний режим і може враховуватися додатково. Тому постійні навантаження зазвичай описуються імовірнісною моделлю випадкової величини з нормальним законом розподілу (2.8). При цьому вважається, що при зведенні об'єкта реалізується випадкове значення постійного навантаження яке не змінюється в процесі експлуатації.

Мінливість розмірів конструкцій заводського виготовлення є меншою, ніж при їх виготовленні в умовах будівельного майданчика, що підтверджено експериментально-статистичними дослідженнями. Так наприклад, коефіцієнти варіації ваги сталевих конструкцій є невеликими ($V=0,02-0,05$) унаслідок високої точності розмірів прокату та практично незмінної густини сталі. Коефіцієнти варіації ваги збірних залізобетонних елементів заводського виробництва є дещо більшими ($V=0,05-0,10$) унаслідок мінливості густини бетону та відсотка армування, а також помітних відхилень від номінальних проектних розмірів (неточність розмірів форм та дозування бетону на виріб). Найбільшою є мінливість ваги конструкцій, виготовлених на будівельному майданчику. Коефіцієнти варіації товщини й ваги монолітних залізобетонних конструкцій, стяжок, засипок, ізолюючих шарів можуть сягати $V=0,10-0,20$ і навіть більше. Наприклад, за даними натурних обстежень отримано коефіцієнт варіації товщини асфальтної стяжки на покрівлі житлового будинку $V=0,23$, а коефіцієнти варіації ваги ізолюючих шарів у покрівлях двох обстежених виробничих будівель дорівнюють $V=0,20$ і $V=0,23$. Тому при нормуванні постійних навантажень враховують вид конструкцій та умови їх виготовлення.

Характеристичне значення навантаження від власної ваги конструкцій Q_0 визначають за стандартами, паспортними даними та робочими кресленнями з урахуванням проектних розмірів і густини матеріалів. При звичайних розрахунках конструкцій воно приймається рівним номінальному значенню за проектом, а при дослідженнях – середньому значенню за даними статистичної обробки результатів обмірювання чи зважування багатьох конструкцій.

Для визначення постійного навантаження за експериментальними даними формується вибірка результатів зважування чи обмірювання конструкцій і виконується її статистична обробка за загальноприйнятою методикою. За формулами (2.17) – (2.19) визначаються числові характеристики: обсяг вибірки N , розмах (X_{min} та X_{max}), середнє значення M , стандарт S і коефіцієнт варіації V . При достатньому обсязі вибірки будується гістограма розподілу. Численними дослідженнями встановлено, що навантаження від ваги конструкцій добре описуються нормальним законом розподілу (2.8). Тому на гістограмі будується відповідна крива густини нормального розподілу, після чого виконується перевірка його відповідності дослідній гістограмі (візуально, за критерієм узгодженості Пірсона (2.23) чи іншим). Отриманий закон розподілу дозволяє перейти до встановлення розрахункових значень постійного навантаження.

Експлуатаційне розрахункове значення постійного навантаження від ваги конструкцій приймають рівним характеристичному, тобто середньому значенню: $Q_e = Q_0 = M$. Забезпеченість встановленого таким чином характеристичного та експлуатаційного розрахункового значення постійного навантаження дорівнює 0,5.

Граничне розрахункове значення, згідно з вимогами ДБН В.1.2-14:2009 [1], визначають як найбільше імовірне значення навантаження з імовірністю перевищення, у 100 разів меншою, ніж для характеристичного значення. Така вимога дає забезпеченість граничного розрахункового значення 0,995. У цьому випадку використання нормального розподілу для досить великої вибірки експериментальних даних дає формулу

$$Q_m = M + t \times S, \quad (4.1)$$

де $t = 2,58$ – аргумент нормального розподілу, що відповідає заданій забезпеченості розрахункового значення 0,995.

Досвід дослідження навантажень від ваги конструкцій показує, що реальні рівні забезпеченості граничних розрахункових значень зазвичай є меншими і рідко перевищують 0,99.

При обстеженнях будівельних конструкцій постійне навантаження доводиться визначати за вибірками невеликого обсягу. У цьому випадку граничне розрахункове значення рекомендується обчислювати за формулою з

ДБН 362-93 [6], яка заснована на понятті толерантного інтервалу і додатково враховує імовірні похибки визначення середнього значення й стандарту за вибіркою малого обсягу:

$$Q_m = M + \alpha \times S / \sqrt{N}, \quad (4.2)$$

де M і S – середнє значення та стандарт вибірки навантаження;

N – обсяг наявної вибірки даних про навантаження;

α – толерантна межа за таблицею, запозиченою з [6]:

$N=$	5	6	7	8	9	12	15	20	25	30	40	≥ 60
$\alpha=$	2,13	2,02	1,94	1,89	1,86	1,80	1,76	1,73	1,71	1,70	1,68	1,67

З метою урахування нерівномірності розподілу постійного навантаження по поверхні покрівлі чи перекриття граничне розрахункове значення можна обчислювати за формулою з [6]:

$$Q_m = M + \frac{1,64 \times S}{\sqrt{1 + 0,1 \times (L + B) + 0,006 \times L \times B}}, \quad (4.3)$$

де M і S – середнє значення та стандарт вибірки навантаження;

L і B – довжина і ширина вантажної площі конструкції, що розглядається.

Формула (4.3) вказує, що на конструкції з невеликою вантажною площею (прогін чи плита покрівлі) може реалізуватися максимум розподіленого навантаження, а в межах значно більшої вантажної площі ферми чи колони це навантаження осереднюється і в сумі стає меншим.

При виконанні розрахунків за методом граничних станів характеристичне значення постійного навантаження Q_0 визначають за стандартами на вироби, каталогами та робочими кресленнями конструкцій з урахуванням їх розмірів і густини матеріалів. Експлуатаційне розрахункове значення Q_e приймається рівним характеристичному, а граничне визначається за формулою

$$Q_m = \gamma_{fm} \times Q_0, \quad (4.4)$$

де $\gamma_{fm}=1,05 \div 1,30$ – коефіцієнт надійності за навантаженням з таблиці 5.1 ДБН В.1.2-2:2006 [2].

У тих випадках, коли постійне навантаження розвантажує конструкцію, приймають $\gamma_{fm} < 1$.

Формули (4.1) і (4.1) дозволяють пов'язати коефіцієнт надійності γ_{fm} з коефіцієнтом варіації навантаження V :

$$\gamma_{fm} = \frac{Q_m}{Q_0} = \frac{M + t \times S}{M} = 1 + t \times V. \quad (4.5)$$

Результати обчислень за формулою (4.5) при різних значеннях рівня забезпеченості розрахункового значення P та коефіцієнта варіації навантаження V наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Залежність коефіцієнта надійності за граничним розрахунковим значенням навантаження від рівня забезпеченості та коефіцієнта варіації

Забезпеченість P	t	Значення γ_{fn} при коефіцієнтах варіації V :						
		0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0,95	1,64	1,03	1,08	1,16	1,25	1,33	1,41	1,49
0,99	2,33	1,05	1,12	1,23	1,35	1,47	1,58	1,70
0,995	2,58	1,05	1,13	1,26	1,39	1,52	1,64	1,77

Дані таблиці показують, що зростання мінливості розмірів конструкцій та густини матеріалів приводить до збільшення коефіцієнта надійності γ_{fn} . Отримані коефіцієнти надійності приблизно відповідають даним ДБН [2] та наведеним вище коефіцієнтам варіації постійного навантаження при рівнях забезпеченості розрахункового значення $P = 0,95\text{--}0,99$. Досягнути рівня забезпеченості $P = 0,995$, рекомендованого ДБН [1], можна шляхом істотного збільшення коефіцієнта надійності γ_{fn} , або зменшення коефіцієнтів варіації за рахунок поліпшення технологій виготовлення виробів та конструкцій.

Рекомендовані джерела інформації:

- [2] – розділ 5
- [3] – розділ 2
- [5] – практичне заняття № 4
- [10] – підрозділ 4.5

4.2 Дослідження та нормування технологічних навантажень на перекриття

Технологічні (корисні) навантаження на перекриття викликані дією ваги обладнання, складованих матеріалів, внутрішньоцехових транспортних засобів, людей тощо і за класифікацією норм [1, 2] відносяться до змінних тривалих навантажень. Оскільки вони діють протягом значної частки терміну експлуатації будівель, для них встановлюють граничні, експлуатаційні та квазіпостійні розрахункові значення.

Корисні технологічні навантаження на перекриття виробничих будівель встановлюються в технологічній частині проекту, виходячи з технології виробництва, характеристик обраного обладнання, необхідності складування матеріалів та їх кількості. Характеристичні Q_0 та квазіпостійні

розрахункові значення корисних навантажень на перекриття громадських і житлових будівель в приміщеннях типового призначення вказані в таблиці 6.2 ДБН В.1.2-2:2006 [2], витяг з якої наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Характеристичні та квазіпостійні розрахункові значення корисних навантажень на перекриття цивільних будівель

Будівлі та приміщення	Характеристичні значення, кПа (кгс/м ²)	Квазіпостійні значення, кПа (кгс/м ²)
1 Квартيري житлових будинків; спальні та житлові приміщення дошкільних закладів, інтернатів, будинків відпочинку, гуртожитків і готелів, палати лікарень	1,5 (150)	0,35 (35)
2 Службові приміщення організацій і установ; класні приміщення освіти, побутові приміщення промислових і громадських будівель	2,0 (200)	0,85 (85)
3 Кабінети і лабораторії охорони здоров'я; лабораторії освіти й науки; приміщення ЕОМ; технічні поверхи	Не менш 2,0 (200)	Не менш 1,2 (120)
4 Зали: а) читальні	2,0 (200)	0,85 (85)
б) обідні (у кафе, ресторанах, їдальнях)	3,0 (300)	1,2 (120)
в) зборів і нарад, чекання, видовищні, спортивні	4,0 (400)	1,7 (170)
г) торгові, виставкові та експозиційні	≥ 4,0 (400)	≥ 1,7 (170)
5 Книгосховища, архіви	≥ 5,0 (500)	≥ 5,0 (500)
7 Трибуни: а) із закріпленими сидіннями	4,0 (400)	1,7 (170)
б) для глядачів, що стоять	5,0 (500)	1,8 (180)
10 Балкони (лоджії) з урахуванням смугового рівномірного навантаження завширшки 0,8 м уздовж огороження	4,0 (400)	1,7 (170)

Дані таблиці 4.2 дають уявлення про можливі величини корисних навантажень на перекриття цивільних будівель. Залежно від призначення приміщень, ці навантаження можуть змінюватися в досить широких межах. Коефіцієнти надійності за граничними та квазіпостійними розрахунковими значеннями рівномірно розподілених навантажень на перекриття дорівнюють $\gamma_{fm}=1,3$ при $Q_0 < 2,0$ кПа і $\gamma_{fm}=1,2$ при $Q_0 \geq 2,0$ кПа. Коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням приймається рівним одиниці: $\gamma_{fe}=1$.

При визначенні навантажень на елементи каркасу будівлі враховують **ефект сполучення навантажень** по площі перекриття та по поверхах, який полягає в тому, що одночасна реалізація розрахункових (максимально можливих) значень навантаження на усій поверхні перекриття та на усіх поверхах є малоімовірною подією. Якщо в одній зоні перекриття корисне навантаження досягає максимуму, то в інших воно може бути значно меншим. Це дозволяє знизити сумарне навантаження на несучі конструкції з великою вантажною площею.

В розрахунках балок, ригелів, плит перекриття характеристичні значення навантажень знижуються множенням на коефіцієнт сполучення ψ_A за пунктом 6.8 ДБН [2], який зменшуються при зростанні вантажної площі. Залежно від призначення приміщень та величини вантажної площі конструкції A ці коефіцієнти визначають за формулами

$$\psi_{A1} = 0,4 + \frac{0,6}{\sqrt{A/A_1}} \quad (A > A_1 = 9 \text{ м}^2) \quad \text{або} \quad \psi_{A2} = 0,5 + \frac{0,5}{\sqrt{A/A_2}} \quad (A > A_2 = 36 \text{ м}^2). \quad (4.6)$$

При визначенні поздовжніх зусиль для розрахунку колон, стін і фундаментів, що сприймають навантаження від двох і більше перекриттів, характеристичні значення навантажень знижуються множенням на коефіцієнт сполучення ψ_n за пунктом 6.9 ДБН [2], який залежить від призначення приміщень і зменшується при зростанні кількості врахованих поверхів n :

$$\psi_{n1} = 0,4 + \frac{\psi_{A1} - 0,4}{\sqrt{n}} \quad \text{або} \quad \psi_{n2} = 0,5 + \frac{\psi_{A2} - 0,5}{\sqrt{n}}, \quad (4.7)$$

де ψ_{A1} , ψ_{A2} – коефіцієнти сполучення (4.6) за пунктом 6.8 ДБН [2].

Навантаження від технологічного обладнання, його ізоляції та заповнення визначають за паспортами та технологічними схемами розміщення обладнання. Це навантаження може задаватися у вигляді зосереджених сил або приводитися до еквівалентного рівномірно розподіленого навантаження. Коефіцієнти надійності за граничним розрахунковим значенням навантаження визначаються з таблиці 6.1 ДБН В.1.2-2:2006 [2], де вони змінюються в межах від 1,0 до 1,2. При проектуванні доцільно враховувати можливе перспективне збільшення технологічних навантажень.

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – розділ 6

[3] – розділ 3

4.3 Фізична природа навантажень від мостових і підвісних кранів

Мостовий кран складається з моста й візка з лебідкою чи жорстким захватом для вантажу. Міст представляє собою одну чи дві паралельні балки, з'єднані по торцях кінцевими балками. Міст крана пересувається уздовж прольоту цеху по підкранових балках, а візок переміщається по мосту впоперек прольоту. Мостові крани загального призначення мають лебідки з поліспастом і вантажним гаком. Крани великої вантажопідйомності обладнані лебідками основного та допоміжного підйому. Візки спеціальних кранів можуть

обладнуватися електромагнітами або робочими органами з жорстким підвісом вантажу. Підвісний кран складається з одно- чи багатопролітної балки, яка пересувається уздовж прольоту по балках, підвішених до конструкцій покрівлі. Уздовж балки крана (поперек прольоту цеху) пересувається тельфер з вантажною лебідкою. Описані конструкції мостових та підвісних кранів дозволяють переміщати вантажозахватний орган в довільну точку цеху за винятком невеликих "мертвих зон" в торцях цеху та поблизу обох рядів колон.

Мостові та підвісні крани використовуються в якості технологічного транспорту або для проведення ремонтних робіт. Інтенсивність використання крана відображається кількістю циклів роботи (підйом, переміщення та опускання вантажу) та коефіцієнтом завантаженості (близькість ваги реальних вантажів на гаку до номінальної вантажопідйомності) та обумовлює належність крана до однієї з восьми груп режимів роботи за ГОСТ 25546-82 (від 1К для кранів з ручним приводом до 8К для безперервно працюючих кранів металургійного виробництва).

У процесі роботи мостовий або підвісний кран створює навантаження трьох видів, які передаються на підкранові конструкції через ходові колеса, як це показано на рисунку 4.1: вертикальний тиск коліс F , горизонтальні навантаження поперек кранових колій H та вздовж кранових колій P .

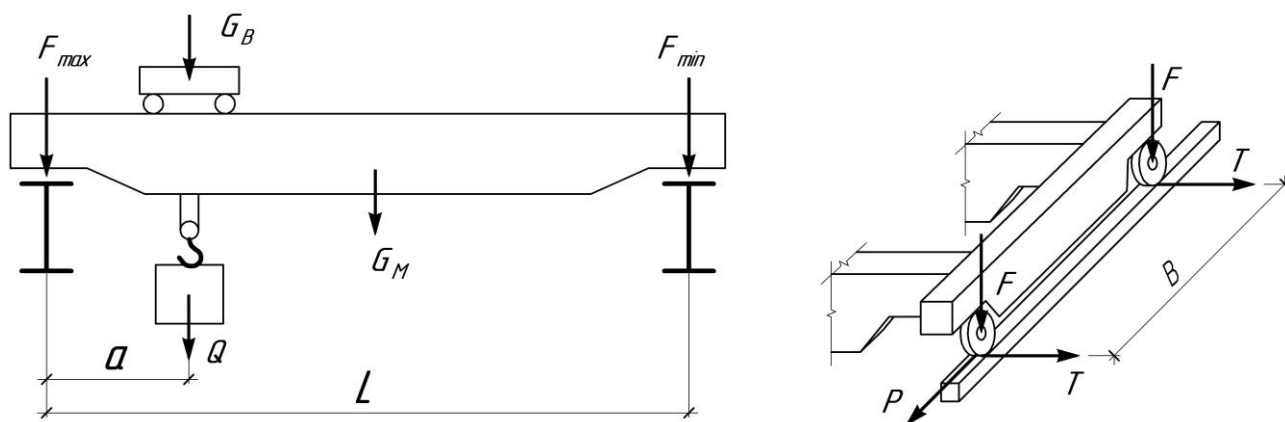


Рис. 4.1 Схема дії навантажень від мостового крана

Вертикальний тиск коліс F обумовлюється вагою моста G_M та візка G_B крана, а також вантажу, що транспортується Q . Величину цього тиску можна визначити, розглядаючи міст крана як балку на двох опорах, навантажену рівномірно розподіленим навантаженням від ваги моста і зосередженою силою від ваги візка та корисного вантажу, як це показано на рисунку 4.1. При максимальному наближенні візка з вантажем до одного з рядів підкранових конструкцій на цей ряд передається максимальний тиск коліс, рівний

$$F_{\max} = \frac{1}{n} \times \left[\frac{G_M}{2} + \frac{G_B + Q}{L} \times (L - a) \right], \quad (4.8)$$

де n – кількість ходових коліс крана на одній колії;
інші позначення наведені на рисунку 4.1.

На протилежний ряд підкранових конструкцій діє мінімальний тиск коліс

$$F_{\min} = \frac{Q + G_M + G_B}{n} - F_{\max} \quad (4.9)$$

Як правило, значення F_{\max} наводиться в стандарті чи в заводському паспорті крана, а величина F_{\min} обчислюється за формулою (4.9).

Вертикальні навантаження можуть нерівномірно розподілятися між колесами крана. Це явище обумовлюється непаралельністю підкранових конструкцій, які внаслідок похибок монтажу чи осадки колон не перебувають в одній горизонтальній площині. В результаті деякі колеса крана можуть частково "зависати" над крановою рейкою, що зменшує навантаження від цих коліс і збільшує навантаження від сусідніх. Експериментальні дослідження в діючих цехах показали, що повного "зависання" коліс не відбувається завдяки незначним відхиленням кранових рейок від горизонталі, наявним люфтам механізмів та крутильним деформаціям моста крана. Навантаження на суміжні колеса чотирьохколісних кранів на одній підкрановій колії можуть відрізнятись приблизно у півтора рази, а нерівномірність вертикального тиску коліс багатоколісних кранів є дещо меншою. Це явище враховується при розрахунках на локальну дію вертикального тиску коліс.

Ще однією причиною додаткового зростання вертикального кранового навантаження є його динамічний характер, обумовлений ривками в роботі вантажної лебідки, розхитуванням вантажу на канатах поліспасти, ударами коліс на стиках рейок та іншими факторами. В результаті експериментальних досліджень роботи кранів встановлені коефіцієнти динамічності, які залежать від типу крана, режиму його роботи та прольоту підкранових балок, пружні деформації яких знижують динамічний вплив кранового навантаження.

Горизонтальне навантаження поперек кранових колій, викликане гальмуванням коліс візка крана, називають гальмівною силою. У декілька разів більшими є бічні сили, які виникають внаслідок дії таких основних факторів:

- непаралельність (розширення та звуження) кранових колій;
- перекося ходових коліс крана відносно моста;
- відмінності в діаметрах ходових коліс крана;
- наявність мастильних матеріалів на кранових рейках.

Бічні сили передаються на підкранові конструкції в основному за рахунок тертя між ходовими колесами та головою кранової рейки. Становище, при якому реборди ходових коліс систематично впираються в головки кранових рейок, є ненормальним і вимагає рихтування кранових колій.

Горизонтальне навантаження уздовж кранових колій виникає при гальмуванні моста крана при русі уздовж цеху. Максимально можливе значення цього навантаження дорівнює силі тертя між гальмівними колесами моста та крановими рейками. Уздовж колій діє також навантаження від удару моста крана в тупикові упори, яке вважається аварійним і враховується в розрахунках цих упорів та їх кріплень до підкранових балок.

Навантаження від підвісних кранів мають приблизно таку ж природу, але замість бічних сил враховуються сили від гальмування візка.

Рекомендовані джерела інформації:

[3] – сторінки 63 – 67, 71 – 85, 98 – 105, 116 – 118

[10] – сторінки

4.4 Експериментальні дослідження, імовірнісне подання та нормування кранових навантажень

З метою імовірнісного опису та нормування проводилися натурні експериментально-статистичні дослідження вертикальних і горизонтальних навантажень від мостових і підвісних кранів в діючих цехах в режимі нормальної експлуатації кранів. Безперервні спостереження проводилися протягом сотень годин в кожному з досліджених цехів різного технологічного призначення. Для експериментально-статистичного дослідження кранових навантажень використовувалося методики двох груп.

Перша група методик дослідження базувалася на періодичній фіксації положень моста й візка, а також ваги вантажу на гаку в процесі нормальної роботи крана. Такі записи проводилися вручну в характерні моменти виконання технологічних операцій, або автоматично через певний інтервал часу. За формулами, аналогічними (4.8), обчислювалися значення вертикального тиску коліс, а також навантаження на колони з використанням відповідних ліній впливу. Отримані результати представляли собою вибірки випадкової величини чи реалізації випадкового процесу вертикального кранового навантаження, які й використовувалися для подальшого статистичного аналізу.

Друга група методик дослідження вертикальних кранових навантажень заснована на використанні існуючих конструкцій в якості динамометрів. Для цього на опорні ребра чи полиці підкранових балок наклеювалися тензодатчики і велися безперервні записи деформацій цих елементів. Результати тарування шляхом встановлення мостових кранів в певну фіксовану позицію з вантажем відомої маси на гаку дозволили перераховувати отримані записи деформацій в реалізації випадкових процесів кранових навантажень.

Горизонтальні навантаження поперек кранових колій досліджувалися шляхом виконання безперервних записів деформацій вузлових елементів, несучих підкранових конструкцій та елементів кранів, які сприймають бічні сили. Різними експериментаторами в якості динамометрів використовувалися існуючі елементи кріплення підкранових балок до колон, встановлені замість існуючих кріплень сталеві смуги з тензодатчиками, а також кінцеві балки мостового крана, коробчатий переріз яких дозволяє одночасно вимірювати вертикальні та горизонтальні навантаження від коліс. Фіксація навантажень велася за допомогою тензодатчиків та самописців різних типів, що дозволило представити результати експерименту у формі стаціонарних випадкових процесів з нормальним розподілом ординати.

Результати проведених досліджень дали змогу представити вертикальні навантаження та бічні сили у формі нормальних стаціонарних випадкових процесів та нормально розподілених випадкових величин. Узагальнення результатів дослідження вертикальних кранових навантажень в декількох десятках металургійних та машинобудівних цехів дозволило отримати статистичні характеристики, які використані при встановленні розрахункових значень кранових навантажень в ДБН [2]. Наведені нижче значення математичного сподівання M і стандарту S розподілу ординати виражені в частках від характеристичного значення навантаження від одного крана, а частотна структура задана кількістю наскрізних проїздів крана по підкрановій конструкції протягом однієї доби.

Для мостових кранів металургійного виробництва з жорстким підвісом вантажу, які характеризуються режимом роботи 8К, встановлені такі статистичні характеристики: $M=0,71$; $S=0,21$; $n=820$ 1/добу.

Для мостових кранів з гнучким підвісом вантажу встановлене значення стандарту $S=0,11$ та математичне сподівання, залежне від вантажної характеристики крана (відношення номінальної вантажопідйомності Q до повної маси крана з візком G_M+G_B):

$$M = 0,61 - 0,24 \frac{Q}{G_M + G_B}. \quad (4.10)$$

Закон розподілу ординати випадкового процесу вертикального кранового навантаження можна вважати нормальним, хоча для кранів з жорстким підвісом вантажу він характеризується помітною лівосторонньою асиметрією.

Частота наскрізних проїздів залежить від режиму роботи крана, а саме:

$n=270$ 1/добу – для кранів режимів роботи 4К–6К;

$n=420$ 1/добу – для кранів режиму роботи 7К;

$n=820$ 1/добу – для кранів режиму роботи 8К.

Наведені статистичні характеристики дозволили з використанням відомих методів теорії надійності встановити залежності граничних розрахункових значень кранового навантаження від їх періоду повторюваності, а також необхідні характеристики циклічного розрахункового значення: мінімальне та максимальне значення еквівалентного синусоїдального процесу циклічного навантаження (залежно від вантажної характеристики крана) та кількість циклів навантаження (частоту наскрізних проїздів крана по конструкції).

При розробленні норм кранових навантажень [2] характеристичні значення вертикального тиску коліс крана прийняті рівними номінальним значеннями, вказаним у державних стандартах чи в паспортах виробників кранів. Характеристичні значення горизонтального навантаження поперек кранового шляху (бічні сили) визначають за формулами (різними для чотириколісних та багатоколісних кранів), які враховують характеристичні значення мінімального й максимального вертикального тиску коліс, розміри прольоту й бази крана, а також тип механізму приводу руху моста (роздільний чи центральний). Характеристичні значення бічних сил відповідають періоду повторюваності близько одного року. Залежно від періоду повторюваності в межах від одного місяця до 50 років, коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням кранового навантаження змінюється від 0,97 до 1,1.

Експлуатаційне розрахункове значення кранового навантаження завжди дорівнює характеристичному. Квазіпостійне розрахункове значення прийняте рівним навантаженню від одного крана без вантажу, що відображає тривалий відстій крана при його ремонтах або перервах у роботі.

Рекомендовані джерела інформації:

- [2] – пункти 7.1 – 7.8
- [3] – сторінки 85 – 89, 107 – 110
- [10] – сторінки 124 – 128

4.5 Навантаження від мостових і підвісних кранів у ДБН В.1.2-2:2006

Мостові та підвісні крани створюють вертикальні й горизонтальні навантаження уздовж і поперек кранових колів. Ці навантаження визначають з урахуванням схеми розташування кранів, режимів їхньої роботи, виду приводу та способу підвісу вантажу. Орієнтовний перелік мостових і підвісних кранів за групами режимів роботи наведений у додатку Г ДБН [2]. Кранові навантаження вважаються змінними короткочасними з чотирма видами розрахункових значень, переліченими в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Визначення навантажень від мостових і підвісних кранів

Види кранових навантажень		Види розрахункових значень			
		граничне	експлуатаційне	квазі-постійне	циклічне
Вертикальне від мостових і підвісних кранів		$F_m = \gamma_{fm} \psi F_0$	$F_e = \gamma_{fe} F_{01}$	$F_p = \gamma_{fp} F_{01}$	$F_{c \max} = \gamma_{fc \max} F_{01}$ $F_{c \min} = \gamma_{fc \min} F_{01}$
Горизонтальне уздовж кранових колій		$P_m = \gamma_{fm} P_{01}$	$P_e = P_{01}$		
Горизонтальне поперек кранових колій	4-кол. мостові	$H_m = \gamma_{fm} H_{01}$	$H_e = H_{01}$	$H_p = \gamma_{fp} H_{01}$	
	інші мостові	$H_m = \gamma_{fm} H_0$			
	підвісні	$R_m = \gamma_{fm} R_0$	$R_e = R_{01}$		

Характеристичні значення кранових навантажень на підкранові балки та колони визначаються згідно з вказівками пунктів 7.3–7.7 ДБН [2] за даними стандартів чи паспортів кранів з урахуванням невідповідного розміщення одного, двох чи чотирьох кранів на відповідних лініях впливу:

F_{01}, F_0 – характеристичні значення вертикального навантаження від одного або двох найбільш несприятливих за впливом кранів;

P_{01} – характеристичне значення горизонтального навантаження вздовж кранової колії від гальмування моста одного крана;

H_{01}, H_0 – характеристичне значення бічної сили від одного або двох найбільш несприятливих за впливом мостових кранів;

R_{01}, R_0 – характеристичні значення поперечних горизонтальних навантажень від одного або двох несприятливих за впливом підвісних кранів.

Коефіцієнти надійності за крановим навантаженням γ_{fm} , γ_{fe} , γ_{fc} і γ_{fp} , визначаються згідно з пунктами 7.9 – 7.12 ДБН [2]. Коефіцієнт сполучення кранових навантажень ψ приймається за пунктом 7.22 ДБН [2] залежно від кількості врахованих кранів та їх режиму роботи. Окрім того, в розрахунках підкранових балок слід враховувати коефіцієнт нерівномірності місцевого вертикального тиску коліс (від 1,1 до 1,6 за пунктом 7.14 ДБН [2]) та коефіцієнт динамічності (1,1 або 1,2 за пунктом 7.15 ДБН [2]).

Циклічне розрахункове значення кранового навантаження задається мінімальним і максимальним значеннями з таблиці 4.3, залежними від вантажної характеристики крана (відношення вантажопідйомності до повної ваги крана), та добовою кількістю циклів навантаження (від 270 до 820 наскрізних проїздів по конструкції протягом однієї доби залежно від режиму роботи крана).

При розрахунках несучих конструкцій слід обирати найбільш не вигідні схеми прикладення вертикальних навантажень та бічних сил з числа рекомендованих пунктами 7.5 і 7.6 ДБН [2]. Для цього виконується перебір можливих варіантів з використанням ліній впливу визначальних силових факторів (згинальних моментів та поперечних сил в підкранових балках, вертикальних і горизонтальних навантажень на колони).

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – розділ 7

[3] – сторінки 67 – 70, 90 – 98, 105 – 106,

[10] – сторінки

4.6 Приклад визначення постійного навантаження від ваги покрівлі за результатами натурного обстеження

У процесі натурних обстежень виробничої будівлі встановлено, що огорожувальна конструкція покрівлі виконана зі сталевого профільованого настилу по прогонах. Гідроізоляція виконана з декількох шарів руберойду, а теплоізоляція – з плит мінеральної вати. З метою встановлення навантаження від ваги огорожувальних конструкцій у покрівлі прорізано 10 шурфів до рівня профнастилу, з яких вибрані та зважені усі наявні там матеріали.

Для встановлення характеристичного, експлуатаційного та граничного розрахункового значення рівномірно розподіленого навантаження від маси огорожувальних конструкцій покрівлі потрібно виконати статистичну обробку вибірки результатів зважування матеріалу з усіх шурфів, приведених до одного квадратного метра поверхні покрівлі. Розрахунки виконуються в середовищі табличного процесора Excel у такій послідовності:

1. Для кожного шурфа обчислюється значення навантаження, рівномірно розподіленого по поверхні покрівлі, шляхом ділення сумарної ваги матеріалів, відібраних із шурфа, на його площу, а отримані результати переводяться в паскалі. Розміри усіх шурфів, результати зважування матеріалів та обчислення рівномірно розподіленого навантаження від маси ізолюючих шарів покрівлі наведені в таблиці:

Показники	Дані для шурфів за номером:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Розміри шурфа в плані, см	20	16	20	18	22	20	22	20	18	16
	22	16	20	20	20	16	18	20	22	20
Маса матеріалів, кг	1,57	0,80	1,94	1,35	1,73	1,51	1,67	1,76	2,40	1,32
Навантаження, Па	357	311	485	376	393	470	422	440	605	413

2. В середовищі Excel з використанням відповідних функцій, описаних в підрозділі 2.6, визначаються числові характеристики вибірки значень рівномірно розподіленого навантаження від огорожувальних шарів покрівлі: обсяг вибірки $N=10$, розмах $X_{\min}=311$ Па та $X_{\max}=605$ Па, середнє значення $M_o=427$ Па, стандарт $S_o=81$ Па.
3. Враховуючи малий обсяг вибірки в 10 даних, гістограма розподілу не будується. Можливість використання нормального закону розподілу визнається на підставі відомих результатів досліджень навантажень від ваги будівельних конструкцій.
4. З урахуванням характеристичного значення рівномірно розподіленого навантаження від ваги настилу $M_H=150$ Па визначаються характеристики сумарного навантаження від маси покрівлі:

$$M = M_o + M_H = 577 \text{ Па}, \quad S = S_o = 81 \text{ Па}, \quad V = S/M = 0,14.$$

5. Згідно з вказівками пунктів 5.1, 5.2 ДБН [2], характеристичне та експлуатаційне розрахункове значення величини постійного навантаження приймаються рівними його середньому значенню

$$Q_o = Q_e = M = 577 \text{ Па}.$$

6. Граничне розрахункове значення постійного навантаження обчислюється згідно з вказівками ДБН [5] щодо розрахунку конструкцій, які перебувають в експлуатації, за формулою (4.2) з урахуванням обсягу вибірки:

$$Q_m = M + \alpha \times S / \sqrt{N} = 577 + 1,84 \times 81 / \sqrt{10} = 624 \text{ Па},$$

де M і S – середнє значення та стандарт навантаження від ваги покрівлі;

$N=10$ – обсяг наявної вибірки даних;

$\alpha = 1,84$ – толерантна межа за таблицею з [5].

Таким чином, за результатами обстежень і розрахунків встановлено, що експлуатаційне розрахункове значення постійного навантаження від ваги огорожувальних конструкцій покрівлі дорівнює $Q_e=577$ Па, а граничне розрахункове значення $Q_m=624$ Па.

Рекомендовані джерела інформації:

[5] – практичне заняття № 4

Розділ 5

КЛІМАТИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ І ВПЛИВИ

5.1 Особливості нормування кліматичних навантажень і впливів

До кліматичних (атмосферних) відносяться: снігове, вітрове, ожеледно-вітрове навантаження (вага ожеледі та вітровий тиск при ожеледі), а також вплив температури атмосферного повітря. Кліматичні навантаження і впливи мають особливості, які потрібно враховувати при їх дослідженні, імовірнісному поданні та нормуванні:

- випадкові зміни в часі при наявності істотної автокорельованості;
- наявність вираженої сезонної мінливості характеристик;
- залежність від географічного положення та висоти над рівнем моря;
- залежність розрахункових значень від встановленого терміну експлуатації будівлі чи його частки.

Дослідження й нормування кліматичних навантажень здійснюється за результатами багаторічних метеорологічних спостережень з урахуванням особливостей фізичної природи конкретного навантаження чи впливу. При цьому реалізуються процедури, засновані на принципах загальної методології нормування навантажень:

1. Статистичні дані про кліматичні фактори отримуються шляхом вимірювань на метеорологічних станціях і постах за уніфікованою методикою та накопичуються в підрозділах гідрометеослужби.
2. Імовірнісні моделі атмосферних навантажень розробляються на підставі статистичного аналізу метеорологічних даних з урахуванням особливостей поведінки досліджуваних процесів та кінцевої мети нормування відповідних навантажень чи впливів.
3. Параметри розробленої імовірнісної моделі визначаються шляхом статистичної обробки результатів багаторічних метеорологічних спостережень і по можливості узагальнюються за рахунок встановлення залежностей між ними, осереднення чи районування по території.
4. Розробляються методики, алгоритми та робочі формули для обчислення характеристичних і розрахункових значень навантаження, які базуються на загальному математичному апараті обраної імовірнісної моделі та враховують її особливості стосовно досліджуваного навантаження (конкретні види законів розподілу, особливості частотної структури, річний хід характеристик тощо).

5. За розробленими формулами чи методиками, що відповідають обраній імовірнісній моделі, обчислюються характеристичні та розрахункові значення навантаження для кожної з метеостанцій.
6. Аналізується територіальна мінливість характеристичних значень дослідженого навантаження та виконується районування території за характеристичними значеннями.
7. Встановлюються правила визначення розрахункових значень навантаження через характеристичні значення, коефіцієнти надійності за навантаженням та інші коефіцієнти, що враховують особливості взаємодії будівельних об'єктів з дослідженим навантаженням (висоту над рівнем моря, форму даху, аеродинамічні характеристики, підтавання снігу на покрівлі тощо).

Випадкові зміни в часі та сезонну мінливість кліматичних навантажень адекватно враховує імовірнісна модель квазістаціонарного диференційованого випадкового процесу. Для її побудови на підставі статистичної обробки багаторічних спостережень за відповідним кліматичним параметром необхідно встановити річні функції числових характеристик: математичного сподівання $M(t)$, стандарту $S(t)$, коефіцієнта варіації $V(t)$ і при необхідності – коефіцієнта асиметрії $A(t)$. Закон розподілу ординати $f(x, t)$ є також змінним у часі, а ефективна частота ω зазвичай незмінна протягом року. Для деяких кліматичних навантажень функції коефіцієнтів варіації та асиметрії також можна вважати незмінними протягом року: $V(t)=\text{const}$, $A(t)=\text{const}$.

Частота перевищень випадковим процесом навантаження $x(t)$ його розрахункового значення X визначається шляхом інтегрування протягом року:

$$\lambda(X) = \frac{\omega}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{1\text{ рік}} S(t) f(X, t) dt, \quad (5.1)$$

де $S(t)$ – функція стандарту;

$f(X, t)$ – змінний у часі закон розподілу ординати.

Прирівнявши (5.1) до допустимої частоти перевищення розрахункового значення $\lambda=1/T$, і чисельно розв'язавши це рівняння відносно X , отримуємо шукане граничне розрахункове значення навантаження, яке перевищується в середньому один раз за T років. Імовірнісна модель квазістаціонарного випадкового процесу дозволяє також визначати експлуатаційні, циклічні та квазістаціонарні розрахункові значення змінних навантажень.

Більш простою, але цілком придатною для встановлення граничних розрахункових значень є імовірнісна модель послідовності екстремальних значень, описана в підрозділі 3.4. Якщо сформулювати вибірки місячних максимумів для кожного місяця року окремо, така модель також відображатиме сезонну мінливість дослідженого навантаження.

Залежність кліматичних навантажень від географічного положення відображається картами територіального районування характеристичних значень. Обчислені за викладеними вище методами характеристичні значення навантаження на окремих метеостанціях утворюють на географічній карті поверхню, яка описує територіальну мінливість цього навантаження. Внаслідок впливу ряду причин ця поверхня має випадкові коливання, а тому побудована за нею карта районування матиме несистематичний вигляд і не відображатиме загальних закономірностей територіальної мінливості навантаження. Отримана випадкова поверхня згладжується шляхом осереднення даних найближчих метеостанцій з ваговим множником у вигляді експоненти, а потім обчислюється верхня межа реальної поверхні навантаження з урахуванням випадкового розкиду даних окремих метеостанцій відносно згладженої (середньої) поверхні. За верхньою межею отриманої поверхні навантаження проводяться межі територіальних районів і будується карта, яка має необхідні запаси територіального районування.

В якості ілюстративного прикладу на рисунку 5.1 зображені середньорічні значення товщини снігового покриву на метеостанціях, розміщених в полосі шириною 40 км, що проходить від Сумської області до Херсону. Ламана лінія з точками вказує на значний випадковий розкид даних, але згладжена функція (жирний пунктир) та верхня межа поля навантаження (точковий пунктир) мають досить плавний характер, який відображає зменшення товщини снігового покриву з півночі на південь України.

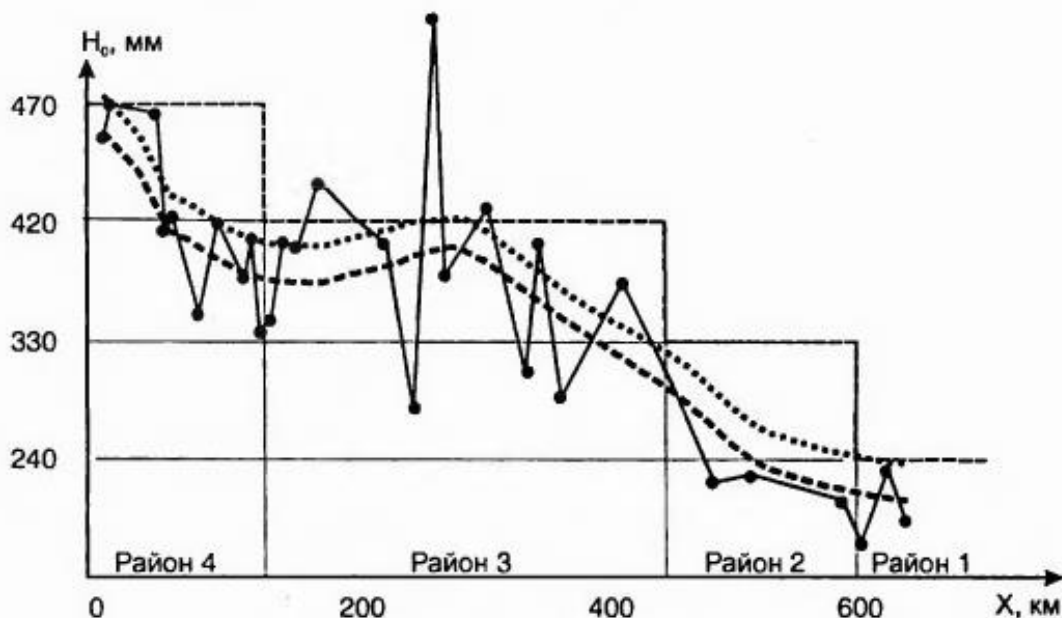


Рис. 5.1 Зміни товщини снігового покриву з півночі на південь України

При визначенні меж територіальних районів за згладженими таким чином даними можуть знайтися метеостанції, для яких районне значення:

- а) з імовірністю P_1 перевищує встановлене районне значення;
- б) з імовірністю P_2 знаходиться в межах районного значення;
- в) з імовірністю P_3 може бути віднесене до попереднього району.

Випадок „б” є бажаним результатом територіального районування. Випадок „а” відповідає місцевостям, для яких карта районування виконана не в запас надійності, а у випадку „в” карта має надто великі запаси. Небажані імовірності P_1 і P_3 мінімізують шляхом вибору достатньо великого кроку градації районних значень. Межі територіальних районів проводяться на карті як ізолінії обраних районних значень на поверхні згладженої верхньої межі поля характеристичного навантаження (аналогічно горизонталям в геодезії).

В умовах наведеного прикладу доцільно встановити чотири територіальні райони з районними значеннями 240 мм, 330 мм, 420 мм і 470 мм. Значення 420 мм обрано таким чином, щоб охопити третім районом помітне "плато" в районі Дніпра. З рисунка 22.1 видно, що районна товщина снігового покриву встановлена не в запас для 3 метеостанцій з 29. Надлишкові запаси також наявні для трьох метеостанцій, отже $P_1 = P_3 = 3/29 = 0,103$, а практично 80% метеостанцій потрапили в межі "свого" територіального району. Значне перевищення даними однієї метеостанції районного значення 420 мм наводить на думку про можливість систематичних похибок вимірювань товщини снігового покриву на цій метеостанції.

Залежність від висоти над рівнем моря відображається спеціальними поправками на висоту, які отримують шляхом порівняння даних гірських пунктів спостереження, які знаходяться недалеко один від одного, але на різній висоті. Такого роду поправки для снігового, вітрового та ожеледно-вітрового навантаження встановлені як ДБН [2], так і нормами навантажень інших країн. Використовують також залежність, згідно з якою температура атмосферного повітря в приземному шарі знижується на 6°C на кожен кілометр висоти над рівнем моря, та інші подібні закономірності.

Залежність розрахункових значень від терміну експлуатації будівлі чи його частки задається коефіцієнтом надійності за граничним та за експлуатаційним розрахунковим значенням навантаження. Дослідження показали, що ці залежності для різних метеостанцій є досить близькими, що дозволило осереднити їх у межах території України та подати у вигляді таблиць коефіцієнтів надійності, що наведені в пунктах 8.11, 8.12, 9.14, 9.15, 10.10, 10.11, 11.8, 11.9 ДБН [2].

Визначення атмосферних навантажень для розрахунків за методом граничних станів здійснюється за вказівками ДБН В.1.2-2:2006 [2] (снігове – розділ 8, вітрове – розділ 9, ожеледно-вітрове – розділ 10, кліматична температура – розділ 11). Характеристичні значення атмосферних навантажень прийняті такими, що можуть перевищуватися в середньому один раз на 50 років. Необхідні розрахункові значення обчислюються за вказівками згаданих розділів ДБН [2] з урахуванням фізичної природи та особливостей дії кожного навантаження на несучі будівельні конструкції.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – підрозділ 7.2
- [3] – підрозділ 1.7
- [10] – підрозділи 1.3– 1.5

5.2 Фізична природа та метеорологічні спостереження за сніговим покривом

Снігове навантаження на покрівлі створюється вагою твердих зимових опадів. Залежно від умов утворення, сніжинки можуть мати різну форму, а сніг – різні технічні характеристики. Систематичні спостереження за сніговим покривом почалися наприкінці XIX століття, коли фіксувалися ступінь покриття снігом досліджуваної ділянки та товщина снігового покриву. Зараз спостереження за сніговим покривом ведуться за стандартною методикою приблизно на 200 метеорологічних станціях і понад 400 метеорологічних постах України. Переважна більшість цих пунктів спостереження розташовані на відкритій місцевості, що відповідає звичайним географічним умовам території України. Першим і найпростішим способом спостережень за сніговим покривом були щоденні вимірювання його висоти постійною рейкою, зображеною на рисунку 5.2. Недоліки цієї методики полягають у визначенні лише товщини снігового покриву в одній точці метеорологічного майданчика.

Більш достовірні результати дають снігомірні зйомки, які проводяться один раз у п'ять або десять діб на відкритій (у полі) або захищеній від дії вітру (галявина в лісі, ліс під кронами дерев) площадці. На деяких метеостанціях проводяться одночасні вимірювання на двох чи трьох площадках. Снігомірні зйомки починають проводити з моменту, коли снігом покрито 50% і більше видимої околиці, і припиняють, коли снігом покрито менше половини ділянки. При товщині снігового покриву менше 5 см густина не визначається, що обумовлено технічними можливостями снігоміра.

У процесі снігомірних зйомок уздовж спеціально розміченого маршруту зазвичай виконується 100 вимірювань товщини снігового покриву і за допомогою снігоміра беруться проби на густину. Об'ємним снігоміром прорізають товщу снігу, отриману пробу зсипають в спеціальну ємкість, де вона тане, і за об'ємом утвореної води визначають вагу проби. Ваговим снігоміром також прорізають товщу снігу, після чого зважують його безпосередньо на місці відбору проби, як це показано на рисунку 5.2.

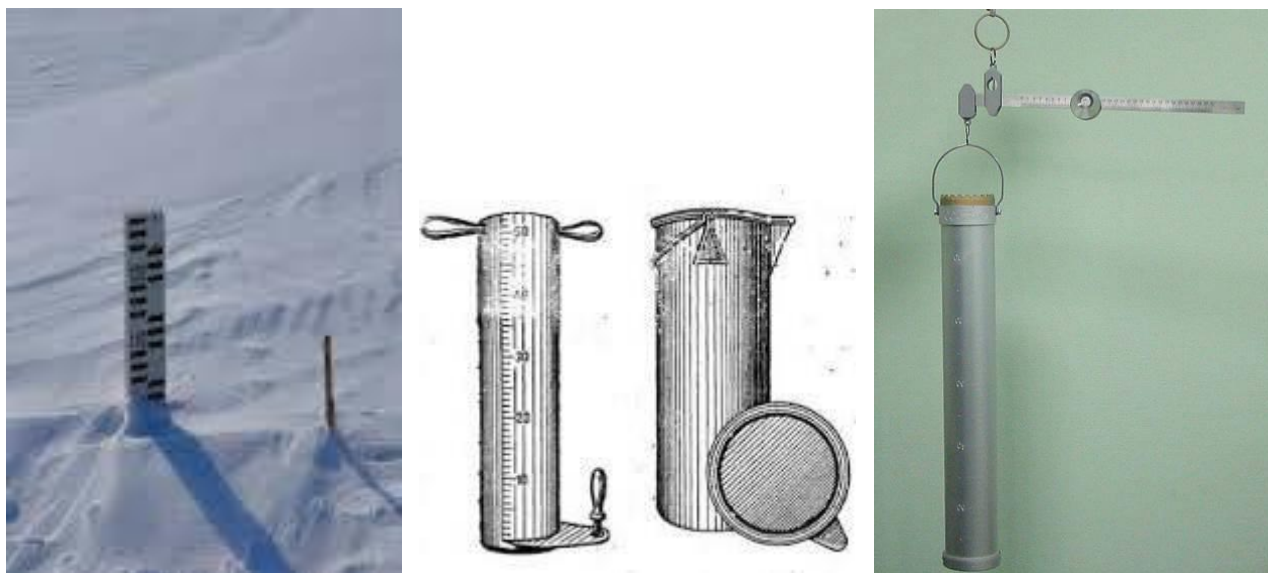


Рис. 5.2 Постійна снігомірна рейка та ваговий снігомір

Кінцевим результатом кожної снігозйомки є середні по маршруту значення товщини, густини та запасу води в сніговому покриві. Запас води, виражений у міліметрах, чисельно дорівнює вазі снігового покриву на поверхні землі в кг/м^2 , тобто сніговому навантаженню на ґрунт. Результати снігомірних зйомок публікувалися в спеціалізованих метеорологічних виданнях. Досить повні дані наявні, починаючи з 1945 року.

На території України середньорічна товщина снігового покриву в основному не перевищує 50 см, зменшуючись з північного сходу на південь. Унаслідок великої мінливості кліматичних факторів товщина снігового покриву в окремі роки може бути як набагато меншою (аж до повної відсутності), так і набагато більшою. Густина свіжого снігу не перевищує 200 кг/м^3 , злежаного $200\text{--}400 \text{ кг/м}^3$, а мокрого може сягати 600 кг/м^3 .

Рекомендовані джерела інформації:

- [3] – сторінки 146 – 149
- [5] – підрозділ 6.1
- [10] – сторінки 50 – 54

5.3 Імовірнісний опис та нормування снігового навантаження

За результатами систематичних снігомірних зйомок на певній метеостанції можна збудувати ансамбль зимових реалізацій випадкового процесу снігового навантаження, приклади яких наведені на рисунку 5.3. На багатосніжній російській метеостанції Кострома (лівий рисунок) реалізація для кожної зими відображає процес поступового накопичення снігу протягом зими і швидке танення весною. На метеостанції Полтава з частими відлигами й менш стійким сніговим покривом (правий рисунок) снігове навантаження мінливіше, але математичне сподівання процесу зміни снігового навантаження (жирні лінії на графіках) має подібний характер.

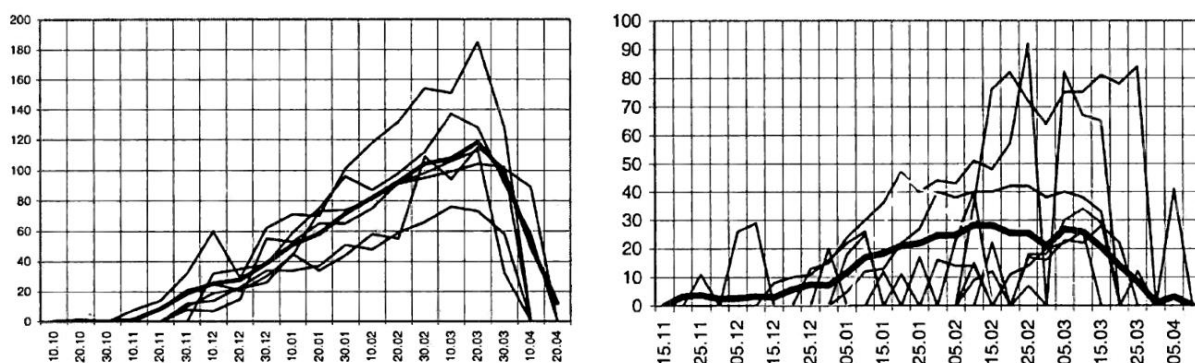


Рис. 5.3 Зимові реалізації випадкових процесів снігового навантаження

Статистичний аналіз подібних ансамблів реалізацій для метеостанцій з різних географічних районів дозволив описати снігове навантаження імовірнісною моделлю квазістаціонарного диференційованого випадкового процесу з поліномо-експоненціальним законом розподілу ординати:

$$f(x) = \exp(a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3), \quad (5.2)$$

де $a_0 - a_3$ – параметри, визначені через математичне сподівання $M(t)$, стандарт $S(t)$ і коефіцієнт асиметрії $A(t)$ дослідного розподілу.

Вказані функції числових характеристик описуються алгебраїчними поліномами третього ступеню або послідовностями числових значень, тому густина розподілу (5.2) також змінюється в часі, тим самим відображаючи нестационарність процесу змін снігового навантаження.

Ефективна частота обчислюється як відношення стандарту похідної, отриманої чисельним диференціюванням реалізації, до стандарту самого процесу снігового навантаження і осереднюється протягом періоду стійкого снігового покриву. В межах України ефективна частота випадкового процесу снігового навантаження приймає значення 0,006 – 0,16 1/добу.

Змінний у часі закон розподілу (5.2) та значення ефективної частоти дозволяють оцінювати річну кількість перевищень випадковим процесом снігового навантаження заданого рівня граничного розрахункового значення та

сумарну тривалість перевищення експлуатаційного розрахункового значення. Тому імовірнісна модель квазістаціонарного диференційованого випадкового процесу може бути використана для нормування граничних, експлуатаційних і квазіпостійних розрахункових значень снігового навантаження. Недоліками цієї моделі є потреба в значних обсягах метеорологічної інформації та необхідність чисельного вирішення поставлених задач.

Більш простою імовірнісною моделлю, яка широко використовується для нормування снігового навантаження, є послідовність річних максимумів ваги снігового покриву. Для побудови цієї моделі із результатів снігомірних зйомок протягом кожної зими спостережень вибираються максимальні значення ваги снігового покриву. Сформовані таким чином вибірки річних максимумів снігового навантаження на ґрунт обробляються методами математичної статистики, описаними в підрозділах 2.5 – 2.7. В результаті обробки отримують середнє значення, стандарт і гістограму розподілу вибірки річних максимумів снігового навантаження. Досвід показав, що коефіцієнт варіації цих вибірок може змінюватися від 0,3 – 0,4 для багатосніжних північних районів до 0,8 – 1,0 для південних районів України з нестійким сніговим покривом.

Результати досліджень вказують на можливість опису послідовностей річних максимумів снігового навантаження законом розподілу Гумбеля (2.13), (2.15). При великих обсягах вибірок максимумів його параметри наближено визначаються через математичне сподівання M та стандарт S вибірки максимумів за формулами (2.14). Більш точні значення дають формули

$$\alpha = M - k_{\alpha} S ; \quad \beta = k_{\beta} S , \quad (5.3)$$

перехідні коефіцієнти яких залежать від обсягу вибірки максимумів N :

$$k_{\alpha} = 0,45 + 0,34 N^{-0,69}; \quad k_{\beta} = 0,78 + 1,54 N^{-0,75}. \quad (5.4)$$

Граничне розрахункове значення снігового навантаження на ґрунт, що відповідає періоду повторюваності T , визначається за формулою, отриманою шляхом подвійного логарифмування закону розподілу Гумбеля (6.8):

$$Q_m(T) = \alpha - \beta \cdot \ln[-\ln(1 - 1/T)] . \quad (5.5)$$

Оцінювання параметрів α і β за формулами (6.7) приводить до простої наближеної формули

$$S_m(T) = M + S(0,78 \times \ln T - 0,45), \quad (5.6)$$

де M і S – середнє значення та стандарт за результатами статистичної обробки вибірки річних максимумів ваги снігового покриву;

$\ln T$ – натуральний логарифм періоду повторюваності.

Характеристичне значення снігового навантаження на ґрунт приймається рівним граничному розрахунковому значенню, що відповідає періоду повторюваності $T = 50$ років, тобто $S_0 = S(50)$. Коефіцієнти надійності за граничним розрахунковим значенням для кожного пункту спостереження обчислюються як відношення розрахункового значення до характеристичного

$$\gamma_{fm}(T) = S(T)/S_0, \quad (5.7)$$

а осереднена по території України залежність коефіцієнтів надійності від періоду повторюваності має вигляд десяткової логарифмічної функції

$$\gamma_{fm} = 0,24 + 0,45 \lg T, \quad (5.8)$$

яка в ДБН [2] подана у формі таблиці.

Викладена методика не вимагає обробки великої кількості дослідних даних і суттєво спрощує обчислення граничних розрахункових значень снігового навантаження за метеорологічними даними з урахуванням заданого періоду повторюваності. Експлуатаційні та квазіпостійні розрахункові значення слід обчислювати на базі описаної вище імовірнісної моделі квазістаціонарного випадкового процесу за методикою, викладеною в [10]. Спрощеним варіантом встановлення уточнених експлуатаційних і квазіпостійних розрахункових значень для конкретного географічного району є використання формул і коефіцієнтів надійності з ДБН [2] та характеристичного значення, обчисленого за (5.5) чи (5.6) та даними конкретного пункту спостереження.

Рекомендовані джерела інформації:

- [2] – пункт 8.5
- [3] – підрозділи 6.2, 6.5
- [5] – практичне заняття № 5
- [10] – сторінки 54 – 72

5.4 Снігове навантаження в ДБН В.1.2-2:2006

В ДБН В.1.2-2:2006 [2] (далі – ДБН) снігове навантаження вважається змінним повторним навантаженням з трьома розрахунковими значеннями:

$$\text{граничним} \quad S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C; \quad (5.9)$$

$$\text{експлуатаційним} \quad S_e = \gamma_{fe} \cdot S_0 \cdot C; \quad (5.10)$$

$$\text{квазіпостійним} \quad S_p = (0,4 \cdot S_0 - 160) \cdot C, \quad (5.11)$$

де S_0 – характеристичне значення снігового навантаження, яке залежить від району будівництва;

γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням, залежний від середнього періоду повторюваності;

γ_{fe} – коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням, залежний від частки встановленого терміну експлуатації конструкції T_{ef} , протягом якої воно може перевищуватися;

C – добуток коефіцієнтів, що враховують форму покрівлі, особливості її експлуатації та висоту розташування над рівнем моря.

Характеристичне значення снігового навантаження S_0 дорівнює вазі снігового покриву на 1 м^2 поверхні ґрунту, яка може перевищуватися у середньому один раз на $T=50$ років. Воно визначається за картою 8.1 ДБН залежно від належності до одного з шести територіальних районів і приймає значення від 800 Па до 1800 Па. Уточнені значення S_0 для міст державного та обласного підпорядкування України наведені в таблиці Е ДБН. В необхідних випадках допускається також визначати характеристичне значення снігового навантаження S_0 шляхом статистичної обробки результатів снігомірних зйомок. Залежності експлуатаційного (5.10) та квазіпостійного (5.11) розрахункових значень від того ж самого характеристичного значення є наближеними і введені з метою спрощення норм.

Коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням γ_{fm} визначається залежно від середнього періоду повторюваності T (в роках) за таблицею 8.1 ДБН, яка отримана за формулою (5.8). Для об'єктів масового будівництва допускається середній період повторюваності T приймати рівним встановленому терміну експлуатації конструкції T_{ef} . Для унікальних та особливо відповідальних об'єктів середній період повторюваності граничного розрахункового значення снігового навантаження визначається за пунктом 8.11 ДБН [2] з урахуванням встановленого терміну експлуатації та необхідної забезпеченості граничного розрахункового значення.

Коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням γ_{fe} визначається за таблицею 8.3 ДБН [2] залежно від частки η встановленого терміну експлуатації конструкції T_{ef} , протягом якої може перевищуватися це розрахункове значення. Значення μ приймається за нормами проектування конструкцій залежно від їх призначення, відповідальності на наслідків виходу за межі другого граничного стану. Для об'єктів масового будівництва допускається приймати $\eta = 0,02$.

Особливості прикладення снігового навантаження на конкретну будівлю чи споруду враховуються коефіцієнтом

$$C = \mu C_e C_{alt} \quad (5.12)$$

де μ – конструктивний коефіцієнт, який забезпечує перехід від снігового навантаження на ґрунт до навантаження на горизонтальну проекцію покрівлі з урахуванням її профілю згідно з пунктами 8.7 і 8.8 та додатком Ж ДБН;

C_e – коефіцієнт режиму експлуатації, який в основному враховує підтавання снігу на холодних покрівлях будівель з надлишковими виділеннями тепла і згідно з пунктом 8.9 ДБН приймається рівним 0,8 при умові забезпечення відводу талої води;

C_{alt} – коефіцієнт географічної висоти, який враховує збільшення снігового навантаження з ростом висоти H розміщення об'єкта над рівнем моря і згідно з пунктом 8.10 ДБН визначається за формулами

$$C_{alt} = 1,4 H + 0 \text{ при } H > 0,5 \text{ км}; \quad C_{alt} = 1 \text{ при } H < 0,5 \text{ км}. \quad (5.13)$$

Таким чином, ДБН В.1.2-2:2006 [2] дають змогу за картою територіального районування та відповідними формулами визначати граничні, експлуатаційні та квазіпостійні розрахункові значення снігового навантаження з урахуванням особливостей навантаження та його взаємодії з конструкціями для усієї території України, включаючи гірські місцевості.

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – розділ 8

[3] – сторінки 153 – 175

[5] – практичне заняття № 2

5.5 Фізична природа та метеорологічні спостереження за вітровим потоком

Вітром називають рух повітря відносно земної поверхні, який викликається різницею тиску в атмосфері. Усі перепади тиску між різними точками земної поверхні безпосередньо чи опосередковано пов'язані з перепадами температури. Якщо в якомусь районі температура вища, повітря в ньому нагрівається і піднімається вгору, створюючи зону низького тиску, в яку починає надходити холодне повітря з сусідніх районів. Чим більша різниця тиску в суміжних областях, тим швидше між ними рухається повітря.

Вітровий потік має такі характерні періоди змін:

- сезонні зміни (на території України зимові вітри сильніші, ніж літні);
- випадкові зміни з періодом в декілька діб;
- добові зміни (бризи в приморських районах);
- пориви з періодичністю в декілька секунд чи десятки секунд.

Пориви вітру вивчають окремо і враховують в динамічних розрахунках конструкцій, зокрема при встановленні коефіцієнтів динамічності. Нижче розглядаються методи дослідження та нормування середньої складової вітрового тиску, яка враховує перші три види змін і створює статичні навантаження на конструкції.

Первинна метеорологічна інформація для вивчення вітрового навантаження отримується в результаті строкових спостережень за вітром, які проводяться в єдині синхронні строки: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 година за Київським часом. Результатом кожного спостереження є швидкість вітру в м/с та напрямок (кутовий градус або румб), осереднені протягом 10 хвилин. Напрямок вітру визначається стороною горизонту, звідки дме вітер (румбом), або кутом, який утворюється напрямком вітру з меридіаном місця спостереження (азимутом). Окрім того, фіксується максимальна швидкість вітру протягом 10 хвилин вимірювання та максимальний порив між строками спостереження.

Для спостережень використовують анеморумбоміри, які забезпечують автоматичне визначення швидкості та напрямку вітру, осереднених протягом 10 хвилин. Прилад, зображений на рисунку 5.4, складається з датчиків швидкості і напрямку вітру, вимірювального пульта і блоку живлення. Чутливими елементами є повітряний гвинт з горизонтальною віссю обертання та флюгарка. Вимірювані характеристики вітру перетворюються в електричні сигнали, які передаються по сполучному кабелю на вимірювальний пульт. Блок датчиків встановлюється на метеорологічному майданчику на щоглі висотою 10-12 м, а вимірювальні пульти та реєстратори – в будівлі метеостанції.



Рис. 5.4 Анеморумбомір та флюгер Вільда

До 60-тих років минулого століття вимірювання швидкості і напрямку вітру проводилися флюгером Вільда, зображеним на рисунку 5.4. Флюгер з легкою дошкою вимірює швидкості вітру до 20 м/с, а флюгер з важкою дошкою – більші швидкості. Як і анеморумбомір, флюгер встановлюється на висоті 10-12 м від поверхні землі та в наш час використовується в якості резервного приладу. Швидкість вітру визначається за кутом відхилення від вертикалі дошки, що обертається навколо горизонтальної осі. Флюгарка, що обертається навколо вертикальної осі, утримує дошку перпендикулярно до вітрового потоку та дозволяє фіксувати напрям вітру. Спостерігач повинен визначити середні протягом 2 хвилин значення швидкості та напрямку вітру. Оскільки дошка флюгера постійно коливається під впливом поривів вітру, результати вимірювань є досить наближеними.

На території України працюють близько 200 метеостанцій та понад 400 метеопостів, що належать до системи Держкомгідромету. Переважну більшість складають рівнинні метеостанції та пости. Результати строкових спостережень за вітром накопичуються в централізованому банку даних Української гідрометеорологічної обсерваторії у м. Київ. Ці дані у первісному (усі результати восьмистрокових спостережень) або в узагальненому вигляді (середні та максимальні швидкості протягом кожного місяця й кожного року спостережень, повторюваність швидкостей вітру за встановленими градаціями) частково публікувалися в спеціалізованих метеорологічних виданнях. Послідовності результатів строкових спостережень утворюють реалізації випадкових процесів швидкості вітру з кроком квантування за часом 3 години, а повторюваність за градаціями по суті є гістограмами розподілу швидкості вітру, за якими можна обчислити статистичні характеристики і встановити закон розподілу швидкості вітру.

Перехід від швидкості вітру v (м/с) до статичної складової вітрового тиску W (Па) зазвичай здійснюється за інженерною формулою

$$W = 0,61 \times v^2, \quad (5.14)$$

яка може бути використана для перерахунку окремих результатів вимірювань, статистичних характеристик розподілів, а також розрахункових значень швидкості вітру в розрахункові значення вітрового тиску.

Окрім строкових спостережень за середньою складовою швидкості вітру, на окремих метеостанціях виконуються безперервні записи малоінерційними анемометрами, які дозволяють вивчати пульсаційну складову швидкості та динамічний вплив вітрового потоку на будівлі та споруди. Зміни швидкості вітру з висотою вивчаються шляхом установки анеморумбомірів на висотних спорудах, а також спостереженнями за спеціально запущеними аерозондами.

Обсяг метеорологічної інформації, накопиченої з 1963 – 1967 років до теперішнього часу, є цілком достатнім для статичного аналізу даних по швидкості і напрямку вітру. Окрім того, при введенні відомих поправок можуть використовуватися також результати чотиристрокових спостережень по флюгеру, які ведуться з кінця 19-го століття.

Використовуючи ці дані, слід пам'ятати, що вони відображають горизонтальні складову швидкості вітру на висоті близько 10 м над поверхнею землі, осереднену протягом 10 хвилин при вимірюваннях анеморумбоміром та протягом 2 хвилин при вимірюваннях флюгером. Перехід до інших висот здійснюється з урахуванням вертикальних профілів швидкості та тиску вітру, отриманих у результаті спостережень на великих висотах.

Рекомендовані джерела інформації:

[3] – сторінки 181 – 189, 203 – 211

[10] – сторінки 78 – 83, 93 – 100

5.6 Імовірнісний опис та нормування вітрового навантаження

Послідовність результатів строкових вимірювань утворює реалізацію випадкового процесу швидкості вітру з інтервалом квантування за часом 3 години, яку за формулою (5.14) можна перетворити в реалізацію випадкового процесу вітрового тиску. Більш узагальненими є гістограми розподілу швидкості вітру, які публікувалися в метеорологічних щомісячниках для окремих місяців спостережень.

Сукупності цих даних для метеостанцій з різних географічних районів дозволили описати швидкість і тиск вітру імовірнісними моделями квазістаціонарних диференційованих випадкових процесів, подібними до опису снігового навантаження. Функції математичного сподівання й стандарту описуються рядами Фур'є, алгебраїчними поліномами третього ступеню або послідовностями числових значень для 12-ти місяців року. Ефективна частота обчислюється за наявними реалізаціями та осереднюється протягом року. За даними [10], в межах України ефективну частоту випадкового процесу вітрового тиску можна прийняти рівною 5,5 1/добу.

Змінні протягом року розподіли ординати з інтегральною функцією $F(q, t)$ та густиною $f(q, t)$ описується законом Вейбулла, який на підставі численних досліджень можна вважати загальноприйнятим для імовірнісного подання результатів строкових вимірювань швидкості вітру. Його густина й інтегральна функція виражаються аналітичними функціями

$$f(x) = \alpha \beta x^{\alpha-1} \exp(-\beta x^\alpha) \quad (5.15)$$

$$F(x) = 1 - \exp(-\beta x^\alpha) \quad (5.16)$$

параметри яких α і β обчислюються за значеннями математичного сподівання M і коефіцієнта варіації V шляхом чисельного рішення трансцендентного рівняння, наведеного в [10]. Форма густини розподілу визначається значенням коефіцієнта варіації вибірки. Розподіли швидкості вітру, для яких $V < 1$, мають асиметричну одновершинну форму з більш розвиненою правою гілкою. Розподілу тиску вітру з $V > 1$ приймають експонентоподібну форму з нескінченно великою густиною при нульовому значенні аргументу.

Описана імовірнісна модель квазістаціонарного диференційованого випадкового процесу може бути використана для нормування усіх видів розрахункових значень швидкості та тиску вітру. Недоліками цієї моделі є потреба в аналізі значних обсягів метеорологічної інформації та необхідність чисельного вирішення більшості задач.

Більш простою, але досить інформативною імовірнісною моделлю є послідовність річних або місячних максимумів швидкості чи тиску вітру. Доказано, що з ряду причин доцільно використовувати послідовності місячних максимумів без урахування сезонної мінливості та напрямку вітру. Для цього із результатів строкових вимірювань протягом вибираються максимальні для кожного місяця спостережень значення швидкості вітру. Сформовану таким чином вибірку місячних максимумів обробляють описаними в підрозділах 2.5 – 2.7 методами математичної статистики, в результаті чого отримують середнє значення M , стандарт S і гістограму розподілу вибірки місячних максимумів швидкості чи тиску вітру. Досвід показав, що в межах території України коефіцієнт варіації вибірок місячних максимумів швидкості вітру може змінюватися від 0,2 до 0,4, а вітрового тиску – від 0,4 до 0,7.

Вибірki місячних максимумів швидкості чи тиску вітру описуються законом розподілу Гумбеля з густиною (2.13) та інтегральною функцією (2.15), параметри якого визначаються через математичне сподівання M та стандарт S за формулами (2.14) або більш точно – за формулами (5.3) і (5.4).

Граничне розрахункове значення швидкості чи тиску вітру, що відповідає періоду повторюваності T , визначається за формулами (5.5) або (5.6) з підстановкою до них періоду повторюваності, вираженого в місяцях. Якщо аналізувалися вибірки місячних максимумів вітрового тиску, вказані формули дають розрахункові значення вітрового тиску. Якщо аналізувалися вибірки місячних максимумів швидкості вітру, результати обчислень за (5.5) чи (5.6) слід перерахувати в розрахункові значення вітрового тиску за формулою (5.14).

Як і для снігового навантаження, характеристичне значення вітрового тиску дорівнює обчисленому граничному розрахунковому значенню з періодом повторюваності $T = 50$ років, тобто $W_0 = W(50)$. Коефіцієнти надійності за граничним розрахунковим значенням для кожного пункту спостереження обчислюються за зразком формули (5.7) як відношення розрахункового значення вітрового тиску до характеристичного й осереднюються по усій території України. Залежність коефіцієнтів надійності від періоду повторюваності отримана дуже близькою до аналогічної залежності (5.8) для снігового навантаження, а в ДБН [2] подана у формі таблиці.

Використання імовірнісної моделі послідовності місячних максимумів суттєво спрощує обчислення граничних розрахункових значень вітрового навантаження за метеорологічними даними з урахуванням заданого періоду повторюваності. Експлуатаційні розрахункові значення вітрового тиску на території України були обчислені за методикою [10] на базі описаної вище імовірнісної моделі квазістаціонарного випадкового процесу. Більш простим варіантом уточнення експлуатаційних розрахункових значень вітрового тиску для конкретного географічного району є використання формул і коефіцієнтів надійності з ДБН [2] та характеристичного значення, обчисленого викладеним вище способом за даними найближчого пункту спостереження.

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – пункт 9.6

[5] – практичне заняття № 6

[10] – сторінки 83 – 92

5.7 Вітрове навантаження в ДБН В.1.2-2:2006

В ДБН В.1.2-2:2006 [2] (далі – ДБН) вітрове навантаження вважається змінним повторним навантаженням з двома розрахунковими значеннями:

$$\text{граничним} \quad W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C; \quad (5.17)$$

$$\text{експлуатаційним} \quad W_e = \gamma_{fe} \cdot W_0 \cdot C, \quad (5.18)$$

де W_0 – характеристичне значення вітрового навантаження, яке залежить від району будівництва;

γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням, залежний від середнього періоду повторюваності;

γ_{fe} – коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням, залежний від частки встановленого терміну експлуатації конструкції T_{ef} , протягом якої воно може перевищуватися;

C – добуток коефіцієнтів, які враховують особливості взаємодії вітрового потоку з будівлею чи спорудою.

Вітрове навантаження на будівлю чи споруду слід розглядати як сукупність трьох складових: нормального тиску, прикладеного до зовнішньої та до внутрішньої поверхні будівлі, споруди чи елемента, а також сил тертя, спрямованих по дотичній до зовнішньої поверхні і віднесених до площі її горизонтальної або вертикальної проекції.

Характеристичне значення вітрового тиску W_0 дорівнює статичній складовій тиску вітру на 1 м^2 перпендикулярної до напрямку вітрового потоку вертикальної площини на висоті 10 м над поверхнею землі, який може перевищуватися у середньому один раз на $T = 50$ років. Значення W_0 встановлюється за картою 9.1 ДБН [2] залежно від розміщення в одному з п'яти територіальних районів і змінюється від 400 Па до 600 Па. Уточнені значення W_0 для міст державного та обласного підпорядкування України наведені в додатку Е ДБН [2] у формі таблиці. В необхідних випадках допускається також визначати характеристичне значення вітрового навантаження W_0 шляхом статистичної обробки результатів строкових вимірювань швидкості вітру. З метою спрощення норм експлуатаційне розрахункове значення (5.18) визначається через те саме характеристичне значення вітрового тиску.

Коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням γ_{fm} визначається залежно від середнього періоду повторюваності T (в роках) за таблицею 9.1 ДБН [2], яка практично відповідає формулі (5.8) для снігового навантаження. Як для усіх кліматичних навантажень, для об'єктів масового будівництва допускається середній період повторюваності T приймати рівним встановленому терміну експлуатації конструкції T_{ef} . Для унікальних та особливо відповідальних об'єктів середній період повторюваності граничного розрахункового значення снігового навантаження визначається за пунктом 9.14 ДБН [2] з урахуванням встановленого терміну експлуатації та необхідної забезпеченості граничного розрахункового значення.

Коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням γ_{fe} визначається за таблицею 9.3 ДБН залежно від частки η встановленого терміну експлуатації конструкції T_{ef} , протягом якої може перевищуватися це розрахункове значення. Значення η приймається за нормами проектування конструкцій залежно від їх призначення, відповідальності та наслідків виходу за межі другого граничного стану. Для об'єктів масового будівництва допускається приймати $\eta = 0,02$.

Особливості взаємодії вітрового навантаження з конкретною будівлею чи спорудою враховуються добутком коефіцієнтів

$$C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d \quad (5.19)$$

де C_{aer} – аеродинамічний коефіцієнт, який визначається залежно від форми та співвідношення розмірів споруди за пунктом 9.8 та додатком І ДБН, який містить схеми розподілу C_{aer} по поверхнях споруд різної форми;

C_h – коефіцієнт висоти споруди, який враховує збільшення вітрового навантаження залежно від висоти над поверхнею землі та від типу навколишньої місцевості (наявність, характеру і висота перешкод вітровому потоку) і визначається за пунктом 9.9 ДБН;

C_{alt} – коефіцієнт географічної висоти, який враховує збільшення вітрового навантаження з ростом висоти H розміщення об'єкта над рівнем моря і згідно з пунктом 9.10 ДБН визначається за формулами

$$C_{alt} = 2 \times H \text{ при } H > 0,5 \text{ км; } C_{alt} = 1 \text{ при } H \leq 0,5 \text{ км; } \quad (5.20)$$

C_{rel} – коефіцієнт рельєфу, який враховує мікрорельєф навколишньої місцевості та положення будівельного об'єкта на схилі чи пагорбі та визначається за пунктом 9.11 ДБН;

C_{dir} – коефіцієнт напрямку, який враховує нерівномірність вітрового навантаження за напрямками вітру і згідно з пунктом 9.12 ДБН зазвичай приймається рівним одиниці (значення $C_{dir} < 1$, допускається враховувати при спеціальному обґрунтуванні за наявності достатніх статистичних даних тільки для відкритої рівнинної місцевості);

C_d – коефіцієнт динамічності, який враховує вплив пульсаційної складової вітрового навантаження і просторову кореляцію вітрового тиску на споруду. Для будівель і споруд зі старшим періодом власних коливань до 0,25 с приймається $C_d = 1$; в інших випадках C_d слід визначати за пунктом 9.13 ДБН залежно від виду та матеріалу споруди, її висоти та розмірів у плані, або виконувати спеціальний динамічний розрахунок.

Таким чином, ДБН В.1.2-2:2006 дозволяють за картою територіального районування та відповідними формулами визначати граничні та експлуатаційні розрахункові значення вітрового навантаження з урахуванням особливостей взаємодії вітрового потоку з конструкціями для усієї території України, включаючи гірські місцевості.

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – розділ 9

[3] – сторінки 189 – 202

[5] – практичне заняття № 2

5.8 Дослідження та нормування навантаження від ожеледі в ДБН В.1.2-2:2006

Ожеледь представляє собою відкладення замерзлої води на відкритих конструкціях, які можуть утворюватися при певному сполученні кліматичних факторів: висока вологість повітря, дощ або мокрий сніг; невелика мінусова температура атмосферного повітря; невеликі швидкості вітру. З рисунка 5.5 видно, що відкладення ожеледі на деревах, проводах та інших конструкціях можуть бути досить великими. Вони створюють додаткові навантаження від їх ваги та збільшують перерізи елементів, що сприймають тиск вітру.



Рис. 5.5 Відкладення ожеледі на деревах і на проводах

Залежно від кліматичних умов, можуть утворюватися різні види ожеледі: від легкої паморозі з густиною $0,1 \text{ г/см}^3$ до щільного льоду з густиною $0,9 \text{ г/см}^3$. Ожеледні відкладення на тонких елементах можуть приймати різноманітні форми, поперечні перерізи яких зображені на рисунку 5.6. Спостереження за ожеледдю проводять за допомогою ожеледного станка, зображеного на рисунку 5.7. Він представляє собою 4 дротини, розміщені на висоті близько 2 м у широтному та меридіональному напрямку. Дві з них є постійними, а дві можуть зніматися для зважування відкладень ожеледі. Під час спостережень вимірюють найбільший і найменший поперечний розміри відкладень, приводять їх до кола еквівалентного діаметра і таким чином визначають еквівалентну товщину стінки ожеледі. Результати зважування дозволяють визначити густину ожеледі та її вагу на погонному метрі дроту, необхідну для розрахунків конструкцій.

Одночасно з вимірюванням товщини стінки і маси ожеледі на початку її утворення та в момент досягнення найбільших розмірів проводяться також спостереження за супутними метеорологічними факторами: швидкістю і напрямом вітру, а також температурою й вологістю повітря. Таким чином, кожен випадок ожеледі характеризується комплексом кліматичних параметрів ожеледно-вітрового навантаження.

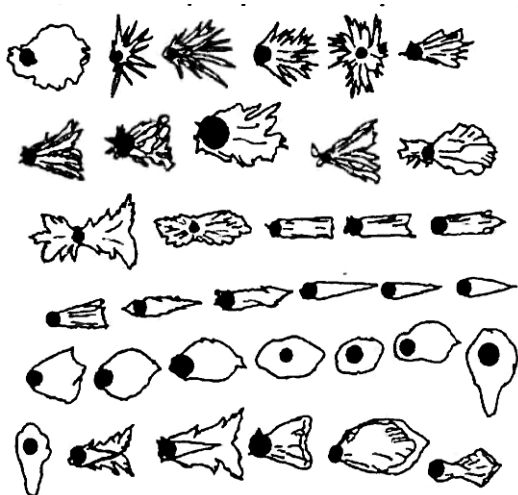


Рис. 5.6 Можливі форми ожеледі на проводах



Рис. 5.7 Ожеледний станок на метеорологічному майданчику

В монографії [3] наведено результати імовірнісного подання ожеледного навантаження у формі імпульсного випадкового процесу з експоненціальним розподілом часу між імпульсами. Модель характеризується середньорічною кількістю імпульсів (від 5 до 25 випадків ожеледі на рік для розглянутих метеостанцій України) та випадковою величиною висоти імпульсу (товщини стінки ожеледі), яка описується законом розподілу Вейбулла.

Більш простою формою імовірнісного подання ожеледно-вітрового навантаження є послідовність річних максимумів товщини стінки ожеледі та ваги ожеледі на проводі, а також вітрового тиску під час ожеледі. Аналогічно сніговому навантаженню, послідовності річних максимумів описуються законом розподілу Гумбеля (2.13), (2.15), параметри якого визначаються за формулами (2.14), або більш точно – за (5.3) і (5.4). Граничні розрахункові значення параметрів ожеледно-вітрового навантаження обчислюються за формулою (5.5), характеристичні значення приймаються рівними граничним розрахунковим значенням для періоду повторюваності $T = 50$ років, а коефіцієнти надійності за ожеледним навантаженням для кожного пункту спостереження обчислюються як відношення розрахункового значення до характеристичного та осереднюються по території України.

В ДБН В.1.2-2:2006 [2] ожеледно-вітрове навантаження враховується як сукупність ваги ожеледних відкладень і нормального тиску вітру на покритті ожеледдю елементи. Воно вважається епізодичним навантаженням, для кожної складової якого встановлюються лише граничні розрахункові значення. Граничне розрахункове значення лінійного розподіленого навантаження від ожеледі на лінійні елементи діаметром до 70 мм обчислюють за формулою:

$$G_m = \gamma_{fG} \pi b k \mu_1 (d + b k \mu_1) \rho g \cdot 10^{-3}, \quad (5.21)$$

де γ_{fG} – коефіцієнт надійності за граничним значенням ваги ожеледі, визначений за пунктом 10.10 [2] залежно від встановленого терміну експлуатації споруди;

b – товщина стінки ожеледі в мм, яка для висоти 10м над поверхнею землі визначається за картою територіального районування чи за таблицею додатка Е ДБН [2] (для міст обласного підпорядкування); для великих висот значення b встановлюється за окремою таблицею з [2];

k – коефіцієнт, який враховує зміни ожеледного навантаження за висотою над поверхнею Землі;

μ_1 – коефіцієнт, який враховує залежність ожеледного навантаження від діаметра елементів кругового перерізу d в міліметрах;

g – прискорення вільного падіння в м/с^2 ;

$\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$ – густина льоду.

Граничне розрахункове значення поверхневого навантаження від ожеледі на площинні елементи та елементи з габаритом поперечного перерізу понад 70 мм обчислюють за формулою

$$G_e = b k \mu_2 \rho g, \quad (5.22)$$

де μ_2 – частка поверхні елемента, що піддається обледенінню (при відсутності точних даних допускається приймати $\mu_2=0,6$);

інші позначення відповідають формулі (5.21).

Вітрове навантаження при ожеледі обчислюється за тими ж правилами та формулами, що й повне вітрове навантаження, але його характеристичне значення визначається за окремою картою територіального районування, коефіцієнт надійності за навантаженням відрізняється від значень для повного вітрового тиску, а деякі складові коефіцієнта C приймаються рівними одиниці згідно з вказівками розділу 10 ДБН [2].

На відміну від ДБН В.1.2-2:2006, нормативний документ з проектування повітряних ліній електропередачі "Правила улаштування електроустановок" безпосередньо встановлює величину ваги ожеледі та вітрового тиску під час ожеледі на один погонний метр провода або троса. Такий підхід є зручнішим і більш точним, оскільки саме проводи і грозозахисні троси безпосередньо сприймають основну частину ваги ожеледі та вітрового тиску під час ожеледі.

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – розділ 10

[3] – розділ 8

5.9 Дослідження та нормування впливу температури повітря на будівлі та несучі конструкції в ДБН В.1.2-2:2006

Коливання температури атмосферного повітря можуть виявляти істотний вплив на напружено-деформований стан несучих будівельних конструкцій. Наприклад, зміна температури сталевого стержня із жорстко затисненими кінцями на 1°C викликає напруження приблизно в 2 МПа, тобто один відсоток від розрахункового опору маловуглецевої сталі. У вільних конструкціях зміни температури виникають переміщення, які змінюють їх форму та розміри. Згідно з положеннями опору матеріалів та будівельної механіки, деформації від змін температури можуть визначатися через коефіцієнт лінійного температурного розширення, а температурні напруження – за законом Гука. У випадку часткового пружного закріплення, як це буває в статично невизначених системах, виникають і переміщення і напруження, визначення яких потребує повного розрахунку статично невизначеної просторової конструкції.

Систематичні спостереження за температурою атмосферного повітря на території України ведуться з 1881 року. Сучасна мережа пунктів спостережень налічує близько 500 метеорологічних станцій і постів. Вимірювання проводяться рідинними термометрами, встановленими на висоті 2 м над поверхнею землі в психрометричній будці, захищеній від дії прямих сонячних променів жалюзями. Максимальний та мінімальний термометри забезпечують точне визначення максимально та мінімальної температури протягом доби, а поточний використовується для строкових спостережень кожні три години. Результати спостережень накопичувалися й публікувалися в спеціалізованих виданнях, де представлені результати строкових вимірювань, місячні та річні середні, мінімальні й максимальні значення, добові амплітуди температури, а також її повторюваність за встановленими градаціями.

В монографіях [3, 10] описана методика подання змін середньодобової температури атмосферного повітря у формі квазістаціонарного випадкового процесу. Функції математичного сподівання, стандарту та коефіцієнта асиметрії середньодобової температури повітря задані послідовностями з 12-ти місячних значень або рядами Фур'є. Виявлені аналітичні залежності стандарту й коефіцієнта асиметрії від математичного сподівання, які дозволяють звести опис числових характеристик лише до функції математичного сподівання. Розподіли ординати описуються нормальним законом (2.8), або змішаним розподілом Гумбеля–Гауса [3], який представляє собою лінійну комбінацію нормального розподілу (2.8) та розподілу Гумбеля (2.13). Частотна структура процесу середньодобової температури повітря задана постійним у часі та єдиним для усієї території України значенням ефективної частоти $\omega=0,6$ 1/добу.

На підставі цієї імовірнісної моделі розроблена практична методика обчислення розрахункових значень температури повітря, необхідних для проектування будівель, огорожувальних і несучих конструкцій.

В силових розрахунках несучих будівельних конструкцій необхідно враховувати не абсолютні значення температури, а її перепади, які викликають температурні деформації, переміщення й напруження в конструкціях. Тому основна ідея урахування температурних впливів на несучі будівельні конструкції полягає в тому, щоб знайти перепад між екстремальною (максимальною чи мінімальною) температурою, яка може виникати у процесі експлуатації, та температурою замикання, яка діяла в момент завершення будівництва. В якості максимальних та мінімальних значень фігурують найбільші та найменші можливі температури повітря, що відповідають заданому періоду повторюваності. Замикання конструкції є не одномоментною подією, а тривалим процесом поступового формування конструктивної схеми, точний час завершення якого передбачити важко або навіть неможливо. Тому в якості температур замикання конструкцій доцільно використати середні температури холодного і теплого півріччя. Різниці між максимальною літньою (мінімальною зимовою) температурою та температурою зимового (літнього) замикання є температурними перепадами, які слід враховувати в розрахунках напружено-деформованого стану несучих будівельних конструкцій.

Описані принципи покладені в основу визначення впливу температури атмосферного повітря на несучі будівельні конструкції в ДБН В.1.2-2:2006 [2], де він вважається змінним навантаженням з граничним, експлуатаційним та квазіпостійним розрахунковими значеннями. Відповідно до викладених принципів, характеристичні значення змін середніх по перерізу елемента температур в теплу Δ_{tw} і холодну Δ_{tc} пору року визначають за формулами:

$$\Delta_{tw} = t_w - t_{0c}; \quad \Delta_{tc} = t_c - t_{0w}, \quad (5.23)$$

де t_{0w} і t_{0c} – початкові температури замикання конструкцій в теплу і холодну пору року, рівні $t_{0w}=15^\circ\text{C}$ і $t_{0c}=0^\circ\text{C}$ для усієї території України;
 t_w і t_c – характеристичні значення екстремальних температур в теплу і холодну пору року.

Характеристичні значення екстремальних температур визначаються на базі середньодобових температур зовнішнього повітря в теплу і холодну пору року, які допускається приймати рівними $t_{ew}=+28^\circ\text{C}$ і $t_{ec}=-20^\circ\text{C}$ для усієї території України. Окрім того, враховується добові коливання температури атмосферного повітря, розміщення конструкцій (відкриті дії сонячної радіації, в неопалюваному чи в опалюваному приміщенні), температури всередині приміщень, тип конструкцій (металеві, легкі чи важкі залізобетонні), вплив сонячної радіації на відкриті конструкції.

Розрахункові значення температурного впливу визначаються шляхом множення характеристичних значень (5.23) на коефіцієнти надійності за навантаженням, які приймаються рівними $\gamma_{fm}=1,1$ для граничного та $\gamma_{fe}=\gamma_{fp}=1,0$ для експлуатаційного і квазіпостійного розрахункового значення.

В розрахунках конструкцій, на які не діє сонячна радіація, враховують середні по перерізу елемента зміни температури, котрі викликають поздовжні переміщення чи зусилля. При дії сонячної радіації на одну з поверхонь конструкції (наприклад стінових панелей) враховують також зміни температури по перерізу елемента, які викликають згинальні зусилля та вигини елементів.

Основними недоліками чинних норм температурних впливів, викладених у розділі 11 ДБН В.1.2-2:2006, є складність їх використання, а також відсутність територіального районування розрахункових параметрів. Нові дослідження показали, що літні температури t_{ow} і t_{ew} мають невелику територіальну мінливість і дійсно можуть бути осереднені в межах України. Зимові температури t_{oc} і t_{ec} більш мінливі, що вимагає розроблення відповідних карт територіального районування. З метою спрощення норм запропоновано встановлювати безпосередньо перепади температури атмосферного повітря, визначені згідно з (5.23). Це дозволяє районувати по території лише температурні перепади в холодну пору року (різницю мінімальних зимових температур та температур літнього замикання конструкцій), а всі інші розрахункові параметри температури атмосферного повітря визначати за виявленими аналітичними залежностями.

Рекомендовані джерела інформації:

[2] – розділ 11

[3] – сторінки 262 – 278

[10] – сторінки 105 – 114

5.10 Приклад нормування снігового навантаження за результатами снігомірних зйомок

За результатами багаторічних снігомірних зйомок на метеостанції Маріуполь сформована вибірка з $N = 37$ річних максимумів ваги снігового покриву на поверхні ґрунту, виражених у паскалях:

290	120	200	710	230	190	230	130	660	340
220	590	170	40	570	460	240	160	140	80
180	330	70	140	80	130	290	110	100	110
260	610	290	210	280	100	90			

Необхідно виконати статистичну обробку наявної вибірки, описати її розподілом Гумбеля, встановити граничні розрахункові значення снігового навантаження на поверхню ґрунту для різних періодів повторюваності та характеристичне значення снігового навантаження. Поставлене завдання розв'язується за методикою нормування снігового навантаження, викладеною у підрозділі 5.3 та в методичних вказівках [5]. Розрахунки виконуються в середовищі табличного процесора Excel у такому порядку:

1. В таблицю EXCEL заносяться задані річні максимуми ваги снігового покриву та визначаються числові характеристики наявної вибірки: обсяг вибірки $N=37$ років, розмах ($X_{\min}=40$ Па, $X_{\max}=710$ Па), середнє значення $M=247$ Па, стандарт $S=178$ Па, коефіцієнт варіації $V=0,718$.
2. Згідно з рекомендаціями методичних вказівок [5], обираються 8 інтервалів довжиною по 100 Па в межах від нуля до 800 Па і будується гістограма розподілу, наведена на рисунку 5.8.

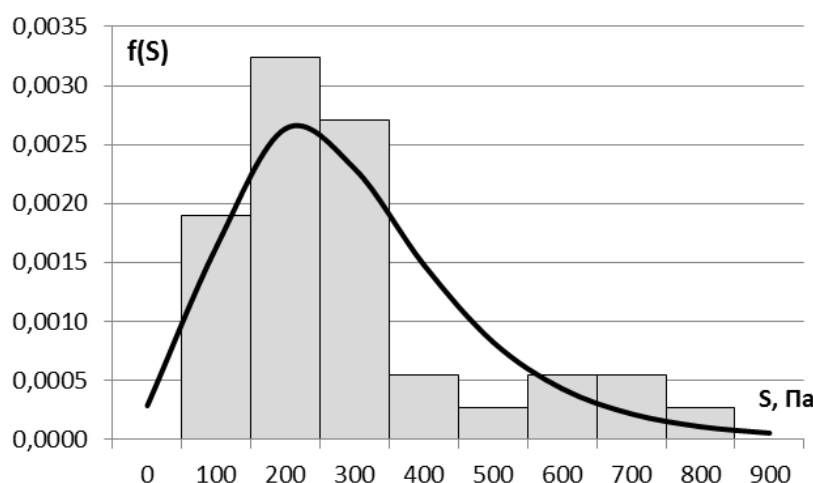


Рис. 5.8 Гістограма розподілу річних максимумів ваги снігового покриву

3. За формулами (2.14) визначаються параметри закону Гумбеля $\alpha=167,4$ Па та $\beta=138,5$ Па, обчислюються значення його густини для кінців інтервалів гістограми розподілу і на гістограму наноситься апроксимуюча крива густини розподілу Гумбеля. Візуальна перевірка вказує на відповідність підібраного розподілу Гумбеля до дослідної гістограми та можливість його використання для нормування снігового навантаження.
4. В середовищі Excel за наближеною формулою (5.6) обчислюються граничні розрахункові значення снігового навантаження для періодів повторюваності в межах від $T = 20$ років до $T = 200$ років. Результати обчислень занесені до таблиці 5.1, де вказані такі величини:

$S(T)$ – розрахункове значення снігового навантаження в паскалях
за результатами розрахунку і за ДБН [2];

T – період повторюваності розрахункового значення в роках;
 γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням
за результатами розрахунку і за ДБН [2].

Таблиця 5.1

Результати обчислення розрахункових значень ваги снігового покриву

Т роки	S(T)		γ_{fm}	
	розрахунок	ДБН	розрахунок	ДБН
20	582	1145	0,82	0,83
50	709	1380	1,00	1,00
100	805	1573	1,14	1,14
150	861	1684	1,21	1,22
200	901	1739	1,27	1,26

Наведені в таблиці 5.1 значення $S(T)$ і γ_{fm} визначені як за результатами розрахунків, так і за ДБН [2] при характеристичному значення для м. Маріуполь $S_0 = 1380$ Па за додатком Е ДБН [2]. Коефіцієнти надійності визначені за таблицею 8.1 ДБН і за формулою (5.7) при обчисленому характеристичному значенні ваги снігового покриву $S_0 = S(50) = 709$ Па.

5. Результати обчислення розрахункових значень снігового навантаження на поверхню ґрунту відображені на рисунку, де лінією з маркерами показані також розрахункові значення за ДБН [2]:

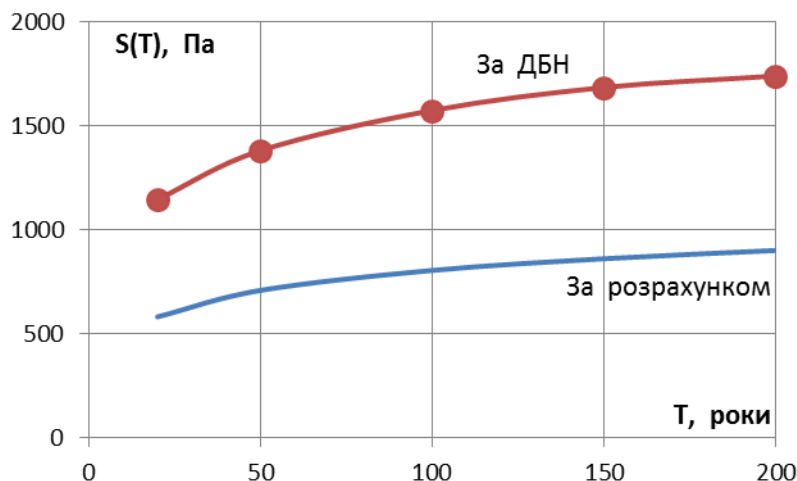


Рис. 5.9 Розрахункові значення снігового навантаження на поверхню ґрунту

Результати розрахунків показують, що граничні розрахункові значення за даними метеостанції отримані майже у 2 рази меншими, ніж за ДБН [2]. Це свідчить про надмірні запаси територіального районування снігового навантаження в районі Маріуполя. Обчислені коефіцієнти надійності за граничним розрахунковим значенням снігового навантаження практично співпадають з відповідними значеннями з ДБН.

Розділ 6

ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ
ТА ПРИНЦИПИ ЇХ ОЦІНЮВАННЯ

6.1 Класифікація відмов технічних об'єктів

Поняття відмови є одним з основоположних понять теорії надійності. **Відмовою** називають будь-яке порушення роботоздатності об'єкта. По відношенню до будівельних конструкцій відмова – це подія, що полягає в переході через один із граничних станів (реалізація позаграничного стану).

Граничним називають стан, за якого подальша експлуатація будівельного об'єкта недопустима, пов'язана з труднощами або недоцільна. Позаграничний стан – це перевищення межі, встановленої нормами для граничного стану.

Протилежним поняттям є **безвідмовність** – здатність об'єкта безперервно зберігати роботоздатний стан протягом заданого терміну експлуатації.

Відмови можна **класифікувати** за декількома наведеними нижче ознаками, взаємозв'язок яких відображено на рисунку 6.1.

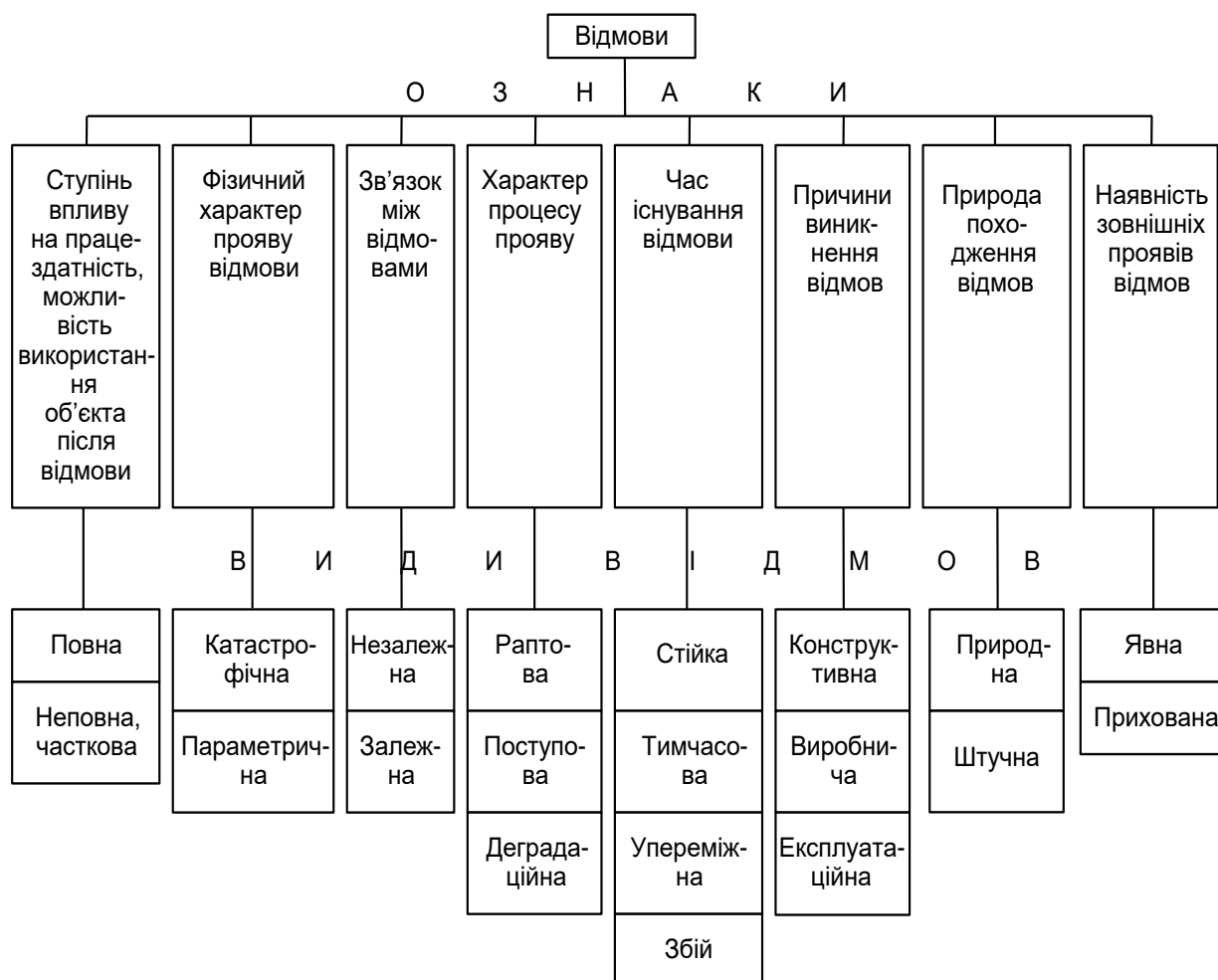


Рис. 6.1 Класифікація відмов технічних систем.

Зовнішні прояви та можливість діагностування відмов:

- явна відмова виявляється візуально або штатними засобами контролю та діагностування.
- прихована відмова виявляється під час технічного обслуговування або спеціальними засобами діагностики.

Причини виникнення відмов:

- конструктивна відмова є наслідком недоліків норм проектування або їх порушення;
- виробнича відмова виникає внаслідок недоліків устаткованого процесу виготовлення або ремонту або порушень його технології;
- експлуатаційна відмова виникає внаслідок порушення встановлених правил і умов експлуатації.

Зв'язок між відмовами:

- незалежна відмова – не зумовлена іншими відмовами.
- залежна відмова – відмова, яка виникає внаслідок інших відмов.

Ступінь і наслідки впливу на працездатність об'єкта (залежно від конкретного вибору об'єкта):

- пошкодження (дефект) – знижує функціональні характеристики об'єкта;
- часткова відмова – погіршення функціонування об'єкта чи вихід з ладу його частини;
- параметрична відмова – часткова відмова, виражена в погіршенні певних функціональних параметрів об'єкта;
- повна (катастрофічна) відмова – припинення функціонування усього об'єкта;
- аварія – пошкодження, вихід із ладу, руйнування, що сталося з техногенних (конструктивних, виробничих, технологічних, експлуатаційних) або природних причин;
- катастрофа – великомасштабна аварія, яка спричинила численні людські жертви, значні матеріальні збитки або інші тяжкі наслідки.

Характер прояву відмови та її наслідків:

- відмова-зрив (раптова відмова) – одразу ж викликає збитки (втрати);
- відмова-перешкода (поступова відмова) – після виникнення відмови починається поступове накопичення збитків (втрат);
- деградаційна відмова – поступова відмова, обумовлена природними процесами старіння, зносу, корозії та втоми, при умові дотримання правил і норм проектування, виготовлення й експлуатації.

Тривалість і характер прояву в часі:

- стійкі відмови мають тривалий характер і усуваються лише за допомогою ремонту, регулювання або заміни елемента, що відмовив;
- тимчасові відмови можуть зникати внаслідок усунення причини, що їх викликала (позанормативний прогин балки внаслідок перевантаження).
- випадкові відмови багаторазово самочинно виникають і зникають.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – розділ 3, підрозділ 6.2

6.2 Показники надійності та довговічності будівельних конструкцій і виробів

Надійністю називають властивість будівельного об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу.

Довговічністю називають властивість об'єкта зберігати роботоздатний стан до настання граничного стану в умовах установленної системи технічного обслуговування та ремонту.

Показники надійності є кількісними характеристиками властивостей, що визначають рівень якості й надійності об'єкта. Вони повинні враховувати тривалість експлуатації об'єкта, а також випадковий характер властивостей об'єкта та впливів експлуатаційного середовища. Вплив вказаних випадкових факторів робить відмову випадковою подією, тому показники надійності та довговічності мають імовірнісний характер.

В якості **показників безвідмовності** найчастіше використовують імовірність безвідмовної роботи чи імовірність відмови об'єкта протягом заданого терміну експлуатації.

Імовірність безвідмовної роботи дорівнює імовірності реалізації події, яка полягає в тому, що протягом заданого терміну експлуатації відмови не відбудеться. Залежність імовірності безвідмовної роботи від терміну експлуатації утворює функцію надійності, яка при стабільних режимах експлуатації може описуватися експонентою

$$P(T) = e^{-\lambda T}, \quad (6.1)$$

де λ – інтенсивність відмов, рівна середній кількості відмов протягом одиниці часу. Для високонадійних будівельних конструкцій значення λ повинно бути дуже малим, щоб імовірність безвідмовної роботи (6.1) наближалася до одиниці, тобто щоб безвідмовна робота була практично достовірною подією.

Інтенсивність відмов більшості технічних об'єктів змінюється в процесі експлуатації, як це показано на рисунку 6.2. Умовно виділяють три часові періоди роботи об'єкта:

- I. Період припрацювання, протягом якого відбуваються відмови дефектних елементів. У великій партії об'єктів чи в багатокomпонентному об'єкті можуть бути деталі з прихованими дефектами, які відмовляють одразу після початку експлуатації. Для недопущення таких відмов використовується обкатка, попереднє тренування, тестові випробування.
- II. Період нормальної експлуатації характеризується приблизно постійною інтенсивністю відмов $\lambda \approx const$. Це основна стадія експлуатації об'єкта, яка має найбільшу тривалість. У цей період реалізується експоненціальна функція надійності (6.1).
- III. Період старіння характеризується значним розвитком процесів зношування та накопичення експлуатаційних пошкоджень, у результаті чого та погіршуються показники якості об'єкта й зростає небезпека відмов. Термін експлуатації технічних об'єктів зазвичай встановлюється меншим, ніж час початку періоду старіння.

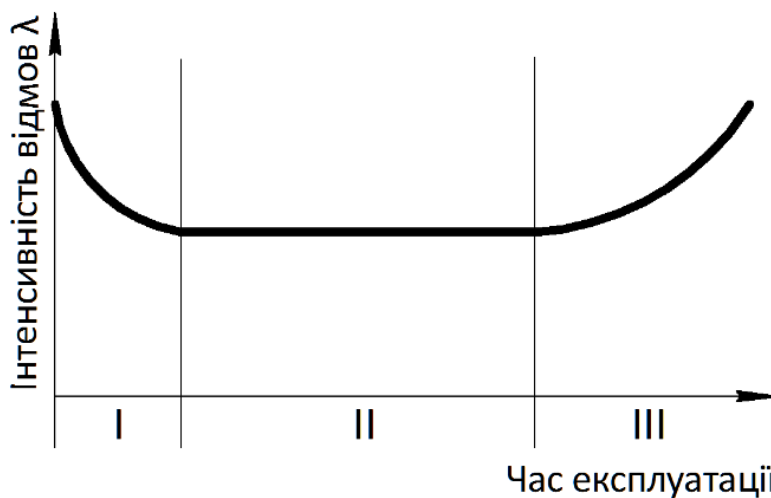


Рис. 6.2 Зміни інтенсивності відмов у процесі експлуатації об'єкта

Імовірність відмови дорівнює імовірності того, що протягом заданого терміну експлуатації відбудеться одна відмова об'єкта, який був роботоздатним у початковий момент часу. Оскільки наявність і відсутність відмови є протилежними, несумісними подіями, то

$$Q(T) = 1 - P(T). \quad (6.2)$$

Імовірність відмови зручніша при порівняльному аналізі рівня надійності конструкцій. Наприклад, про значення імовірностей відмови $Q_1=0,001$ і $Q_2=0,0001$ можна сказати, що вони відрізняються у 10 разів, а значення імовірностей безвідмовної роботи $P_1=0,999$ і $P_2=0,9999$ порівнювати важче.

В якості **показників довговічності** найчастіше використовують середній та гамма-відсотковий строк служби (або наробіток до відмови). **Наробітком** називають обсяг роботи, виконаної об'єктом, у характерних для нього одиницях вимірювання. Наприклад, пробіг автомобіля, кількість робочих циклів вантажопідйомного механізму, кількість проїздів мостового крана по підкрановій балці, кількість циклів заморожування цегли чи бетону тощо. Для будівельних об'єктів зручніше використовувати термін експлуатації (строк служби), рівний календарному часу використання об'єкта за призначенням.

Середній строк служби – це математичне сподівання часу експлуатації об'єкта до першої відмови. За результатами випробувань N однотипних об'єктів його можна визначити як середнє значення із строків служби до відмови кожного об'єкта T_i :

$$T_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i. \quad (6.3)$$

Гамма-відсотковий строк служби T_γ – строк служби, протягом якого відмова об'єкта не виникає з імовірністю γ , вираженою у відсотках. По відношенню до вибірки однотипних об'єктів T_γ є строком служби, протягом якого безвідмовно працюють $\gamma\%$ об'єктів. Зазвичай при прогнозуванні довговічності будівельних конструкцій та виробів використовують досить високі значення $\gamma = 90, 95, 99\%$ і вищі. Гамма-відсотковий строк служби можна також вважати гарантійним строком служби конструкції чи виробу при забезпеченості $\gamma\%$. На практиці це означає, що протягом часу T_γ можуть потребувати ремонту чи заміни $(1-\gamma)\%$ виробів, що перебувають в експлуатації.

Рекомендовані джерела інформації:

[1] – розділ 3

6.3 Фізичні механізми та моделі відмов будівельних конструкцій і виробів

Фізичні механізми виникнення відмов будівельних конструкцій і виробів проілюструємо одиничними прикладами, у яких розглядається одна конструкція чи виріб з певними характеристиками опору під дією певної реалізації процесу зовнішнього впливу. У цих прикладах зміни в часі зовнішнього впливу та характеристики опору матеріалу будемо вважати детермінованими процесами, перетин реалізацій яких і призводить до відмови в певний момент часу. В реальності впливи експлуатаційного середовища є непередбачуваними, випадковими процесами, а характеристики опору

матеріалу, виробу чи конструкції цим впливам – випадковими величинами або випадковими процесами. Це робить відмову випадковою подією, момент виникнення якої передбачити неможливо і яка характеризується лише імовірністю її виникнення протягом встановленого терміну експлуатації конструкції чи виробу.

Відмова від руйнування чи розвитку надмірних пластичних деформацій в елементі конструкції виникає в той момент, коли випадковий процес навантажувального ефекту $q(t)$ перевищує межу опору конструкції, елемента чи виробу $r(t)$. Схема виникнення такої відмови для одного конкретного зразка показана на рисунку 6.3, де момент відмови зображено жирною крапкою.

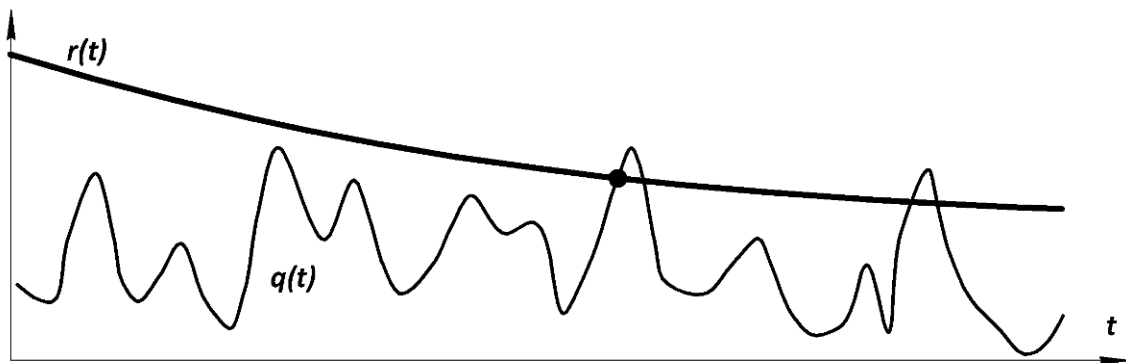


Рис. 6.3 Виникнення відмови від руйнування

Як правило, навантажувальний ефект (зусилля в елементі, напруження в характерній точці перерізу тощо) є випадковим процесом, характеристики якого визначаються діючими навантаженнями на конструкцію. При наявності процесів зношування конструкції чи старіння матеріалу опір матеріалу, елемента чи конструкції може бути спадаючим випадковим процесом, одна з реалізацій якого зображена на рисунку 6.3. При незмінних у часі технічних характеристиках матеріалів та практичній відсутності зношування конструкції опір можна подати у вигляді незмінної в часі випадкової величини, що для одного зразка на рисунку 6.3 можна було зобразити горизонтальною лінією $r(t)$ замість наведеної там спадаючої кривої.

Відмова від перевищення граничного значення прогину конструкції чи допустимої ширини розкриття тріщини в залізобетонному елементі може реалізовуватися декілька разів протягом терміну експлуатації конструкції. На рисунку 6.4 показана реалізація $v(t)$ випадкового процесу переміщення певної точки конструкції чи зміни ширини тріщини, викликана дією випадкових процесів зовнішніх навантажень. Гранично допустимі значення переміщення чи розкриття тріщини f_{lim} зазвичай задаються в ДСТУ Б В.1.2-3:2006 "Прогини і переміщення" чи в нормах проектування конструкцій у вигляді детермінованих величин, що має дещо умовний характер.

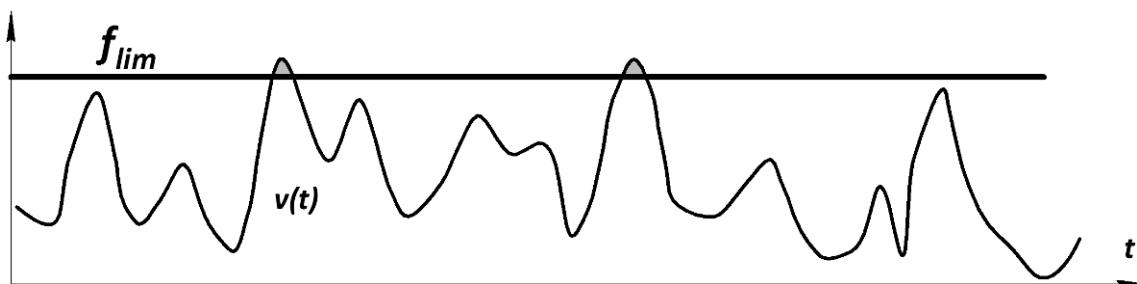


Рис. 6.4 Виникнення відмови від перевищення граничного прогину чи допустимої ширини розкриття тріщини

Оскільки перевищення граничного значення прогину конструкції чи допустимої ширини розкриття тріщини в залізобетонному елементі відноситься до другої групи граничних станів, визначальну роль може відігравати не сам факт виникнення такої відмови, а тривалість перебування конструкції в стані відмови. Саме тому в звичайних розрахунках перевірка граничних станів цього виду здійснюється з урахуванням експлуатаційних розрахункових значень навантажень і впливів. При імовірнісному розрахунку конструкцій також необхідно оцінювати не лише імовірність виникнення таких відмов, а й імовірну (середню, найбільшу, найменшу) тривалість перебування конструкції в стані відмови протягом встановленого терміну експлуатації.

Теплова відмова огорожувальної конструкції виникає у тому випадку коли певна теплова характеристика виходить за межі, встановлені нормами проектування з умов комфортності, недопущення конденсації водяної пари на поверхнях огорожувальних конструкцій чи надмірних втрат тепла.

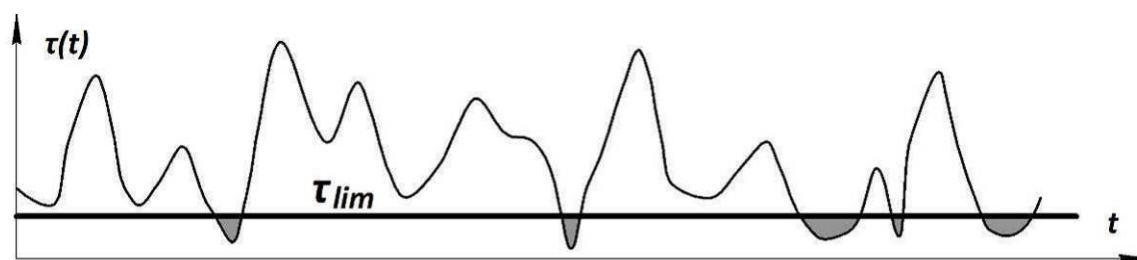


Рис. 6.5 Виникнення теплової відмови огорожувальної конструкції

Модель виникнення теплової відмови проілюстровано рисунком 6.5, на якому зображена реалізація випадкового процесу змін температури $\tau(t)$ та нормоване обмеження τ_{lim} у вигляді горизонтальної лінії. Прикладом реалізації $\tau(t)$ можуть бути зміни температури внутрішньої поверхні стіни внаслідок випадкових коливань температури зовнішнього повітря, а обмеження τ_{lim} дорівнює точці роси (подальше пониження температури призводить до конденсації вологи на стіні), або нормованій температурі, при пониженні якої починає відчуватися дискомфорт від перебування поблизу стіни. Іншим

варіантом реалізації $\tau(t)$ може бути випадковий процес температури зовнішнього повітря, а обмеження τ_{lim} є температурою, при якій стіна з певним опором теплопередачі забезпечує достатній рівень теплової ізоляції. Оскільки тепла відмова не призводить до повної втрати працездатності об'єкта, її слід віднести до другої групи граничних станів та разом з імовірністю її виникнення оцінювати також тривалість перебування огорожувальної конструкції в стані відмови, яка вказана на рисунку 6.5.

Відмова внаслідок втрати морозостійкості матеріалу виникає тоді, коли зростаючий випадковий процес накопичення циклів заморожування-відтавання $n(t)$ перевищить значення показника морозостійкості F , що й відмічене на рисунку 6.6 жирною крапкою. На реалізації процесу накопичення пошкоджень з рисунка 6.6 горизонтальними лініями відображені літні періоди, а похилими – зимові, підчас яких і реалізуються цикли заморожування-відтавання.

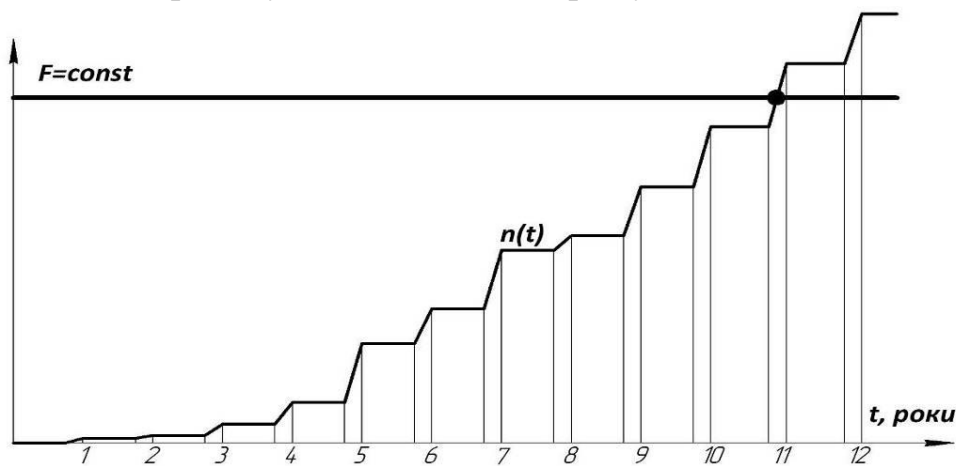


Рис. 6.6 Виникнення відмови від втрати морозостійкості

Показник морозостійкості, який визначають в результаті спеціальних випробувань, дорівнює кількості стандартних циклів заморожування-відтавання, які може витримати матеріал до руйнування або до виникнення недопустимих пошкоджень. У більшості випадків стандартний цикл полягає в заморожуванні матеріалу, повністю насиченого водою, до температури -18°C . Показник морозостійкості матеріалу можна подати в формі випадкової величини, середнє значення якої називають маркою за морозостійкістю.

Основна складність при оцінюванні надійності й довговічності за критерієм втрати морозостійкості полягає в тому, що в реальних умовах експлуатації заморожування відбувається при різних температурах та різних ступенях насичення пор матеріалу водою. Тому виникає проблема визначення еквівалентної кількості стандартних циклів заморожування-відтавання за фактичною кількістю реальних циклів. Ця складна задача розв'язується шляхом проведення випробувань при різних значеннях вологості матеріалу та побудови залежностей показника морозостійкості від ступеню насичення пор водою.

Відмова внаслідок стирання поверхневого шару матеріалу або внаслідок розвитку корозії виникає при перевищенні процесом зношування $\Delta(t)$ певного граничного значення Δ_{lim} , як це показано на рисунку 6.7.

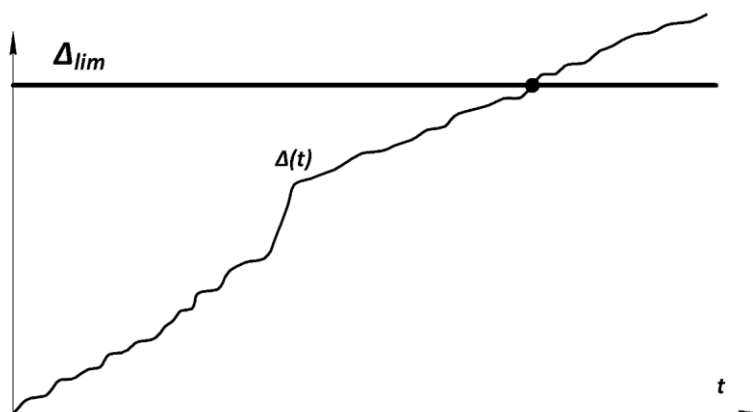


Рис. 6.7 Виникнення відмови від стираності поверхні

Неспадаючий випадковий процес $\Delta(t)$ може відображати глибину корозії сталі, зменшення площі чи іншої геометричної характеристики поперечного перерізу елемента конструкції, глибину стирання поверхневого шару конструкції чи масу стертого матеріалу тощо. Граничне значення Δ_{lim} встановлюється, виходячи несучої здатності пошкодженої конструкції, або з урахуванням функціональних та естетичних вимог до поверхні, що стирається.

Опір будівельних матеріалів стираності встановлюється за результатами експериментальних досліджень при дії певного стандартизованого стираючого впливу. Наприклад, зразки бетону випробують на спеціальному чавунному крузі при певному притискаючому зусиллі з використанням кварцевого піску або корунду в якості стираючого матеріалу. Умовний характер отриманих результатів ставить проблему переходу від інтенсивності стираючого впливу в реальних умовах експлуатації до еквівалентного стандартизованого впливу.

Подібним чином створюються імовірнісні моделі відмов будівельних конструкцій та виробів з іншими фізичними механізмами їх реалізації. При цьому реалізується загальна процедура: вивчення фізичної суті відмови, розроблення моделі відмови одного конкретного зразка конструкції чи виробу, встановлення переліку випадкових параметрів та можливостей їх подання у вигляді випадкових величин чи випадкових процесів, розроблення та інформаційне наповнення імовірнісної моделі, за якою можна визначити імовірність відмови конструкції чи виробу.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – підрозділи 6.1, 6.2
- [13] – сторінки 27 – 34

6.4 Принципи розрахункового оцінювання показників надійності

Надійністю називають властивість будівельного об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу.

Показниками надійності зазвичай служать імовірність безвідмовної роботи та імовірність відмови об'єкта протягом заданого терміну експлуатації.

Імовірність безвідмовної роботи $P(T)$ дорівнює імовірності того, що протягом заданого терміну експлуатації T відмови не відбудеться.

Імовірність відмови $Q(T)$ дорівнює імовірності того, що протягом заданого терміну експлуатації T відбудеться одна відмова об'єкта, який був роботоздатним у початковий момент часу.

Оцінювання імовірності відмови чи імовірності безвідмовної роботи завжди можна звести до аналізу граничної нерівності

$$q \leq r, \quad (6.4)$$

де q – випадковий навантажувальний ефект;

r – випадкова несуча здатність елемента конструкції.

На рисунку 6.8 зображена схема оцінювання імовірності відмови Q при дії випадкового процесу навантаження $q(t)$ на конструкцію, несуча здатність якої $r(t)$ випадковим чином змінюється в часі. Якщо несуча здатність не змінюється в часі, вона описується моделлю випадкової величини, середнє значення якої $r(t)=const$ утворить на рисунку 6.8 горизонтальну лінію.

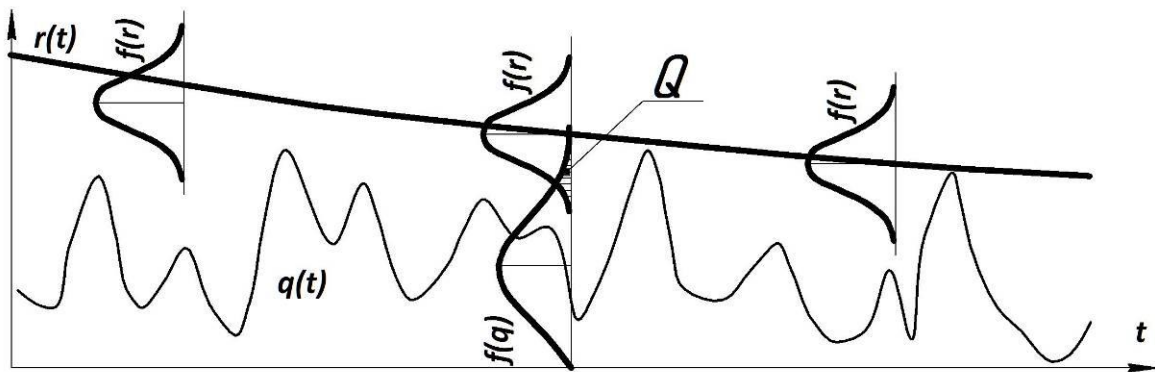


Рис. 6.8 Схема визначення імовірності відмови при дії випадкового процесу навантаження на конструкцію з випадковою міцністю

На підставі граничної нерівності (6.4) можна записати загальну формулу для визначення імовірності безвідмовної роботи конструкції протягом терміну експлуатації T

$$P(T) = P\{q(t) \leq r(t)\}, \quad (6.5)$$

де $P\{\dots\}$ – оператор визначення імовірності події, записаної в фігурних дужках.

При одночасній дії n навантажень $q_i(t)$ їх навантажувальні ефекти потрібно скласти з урахуванням коефіцієнтів впливу α_i , що приводить до виразу

$$P(T) = P\left\{\sum_{i=1}^n \alpha_i q_i(t) \leq r(t)\right\}. \quad (6.6)$$

При розрахунку за граничними станами другої групи замість випадкового процесу несучої здатності враховується детерміноване нормативне обмеження навантажувального ефекту C (допустима величина прогину, ширина розкриття тріщини тощо). Це приводить до оцінювання імовірності безвідмовної роботи на основі виразу

$$P(T) = P\left\{\sum_{i=1}^n \alpha_i q_i(t) \leq C\right\}. \quad (6.7)$$

Імовірність відмови протягом встановленого терміну експлуатації визначається за виразами, аналогічними (6.5) – (6.7), в яких знак " \leq " (не більше) замінено на знак " \geq " (не менше), або через імовірність безвідмовної роботи: $Q(T) = 1 - P(T)$. Очевидно, що при збільшенні терміну експлуатації імовірність безвідмовної роботи зменшується, а імовірність відмови зростає.

Конкретна реалізація загальних виразів (6.5) – (6.7) залежить від імовірнісних моделей, використаних для опису несучої здатності конструкції та навантажень на неї. У найпростіших випадках показники надійності можуть визначатися за аналітичними виразами чи їх послідовностями, а використання складніших імовірнісних моделей випадкових процесів може привести до досить складних обчислювальних процедур.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – розділ 8, додаток В
- [4] – сторінки 56 – 60
- [13] – сторінки 19 – 27, 107 – 108

6.5 Імовірнісне подання властивостей будівельних матеріалів

Залежно від мети розрахунку, при аналізі надійності використовуються різні технічні характеристики будівельних матеріалів, але всі вони мають випадковий характер. У більшості випадків технічні характеристики матеріалів практично не змінюються в часі, що дозволяє представити їх у вигляді випадкових величин. Для розрахунків надійності досить знати вид закону розподілу відповідної характеристики матеріалу та його параметри. Числові характеристики й закони розподілу випадкових величин технічних

характеристик будівельних матеріалів встановлюються шляхом статистичної обробки вибірок, сформованих за результатами відповідних випробувань. Переважна більшість технічних характеристик будівельних матеріалів, у тому числі показники міцності, границя текучості, середня густина, коефіцієнт теплопровідності можуть бути описані випадковою величиною з нормальним законом розподілу (2.8), який задається середнім значенням і стандартом.

З математичної точки зору використання нормального розподілу, який має нескінчену область визначення, протирічить тому, що технічні характеристики будівельних матеріалів не можуть мати від'ємних значень. Розрахунок показує, що імовірність реалізації від'ємних значень нормально розподіленої випадкової величини при коефіцієнті варіації $V=0,25$ (міцність деревини) дорівнює 3×10^{-5} , при $V=0,15$ (міцність бетону) дорівнює 1×10^{-11} , а при $V=0,1$ (міцність сталі) дорівнює 8×10^{-24} . Такі імовірності можна вважати практично рівними нулю, а тому практичне використання нормального закону розподілу для імовірнісного опису технічних характеристик будівельних матеріалів є цілком оправданим.

При наявності результатів випробувань серії зразків середнє значення й стандарт дослідженої технічної характеристики визначають шляхом їх статистичної обробки за методикою, викладеною в розділі 2. Для орієнтовних розрахунків надійності наближені значення математичного сподівання M і стандарту S характеристик міцності матеріалів можна отримати за наведеними в нормах проектування сталевих, залізобетонних і дерев'яних конструкцій значеннями розрахункового чи характеристичного опору R та відомими коефіцієнтами варіації V показників міцності:

$$M = R / (1 - t \times V); \quad S = M \times V. \quad (6.8)$$

В формулах (6.8) враховують, що коефіцієнти варіації V характеристик міцності будівельних матеріалів зазвичай приймають такі значення: сталь – 0,06...0,12 (більші значення для міцніших сталей); важкий бетон – 0,10...0,15 (норма проектування залізобетонних конструкцій передбачено $V=0,135$); деревина – 0,15...0,25 (менші значення для міцності уздовж волокон, а більші – поперек волокон).

При використанні в формулах (6.8) значень розрахункового опору матеріалу аргумент функції нормального розподілу t приймають в межах від $t=2,6$ до $t=3,1$ відповідно до встановленого в ДБН [1] рівня забезпеченості розрахункового опору будівельних матеріалів від 0,995 до 0,999. На практиці можна приймати $t=3,0$ для сталі та $t=2,8$ – для бетону, що приблизно відповідає рівням забезпеченості розрахункового опору 0,998 та 0,997.

При використанні в формулах (6.8) значень характеристичного опору матеріалу приймають $t=1,64$ відповідно до встановленого в ДБН [1] рівня забезпеченості характеристичного опору будівельних матеріалів 0,95. Для деревини розрахунки за формулою (6.8) краще виконувати через характеристичний опір, оскільки при встановленні розрахункового опору враховується вплив вад деревини, які істотно зменшують її міцність.

При необхідності урахування змін технічних характеристик матеріалів у процесі експлуатації можна скористатися спрощеною моделлю монотонно спадаючого випадкового процесу, реалізації якого зображені на рисунку 6.9.

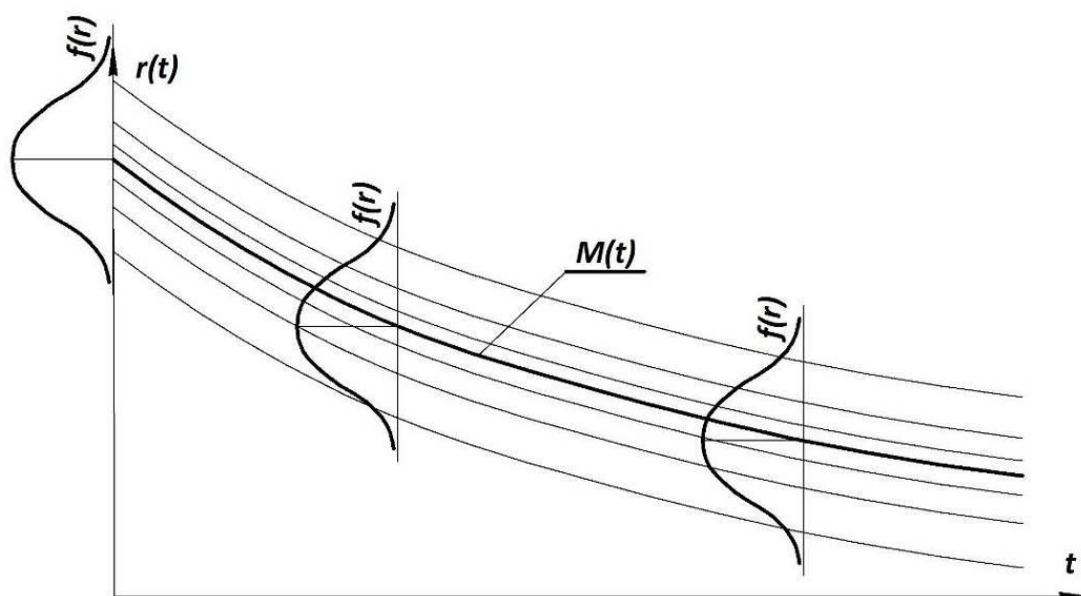


Рис. 6.9 Реалізації випадкового процесу зниження міцності

Як правило, значення стандарту $S=const$ приймається незмінним у часі, а середнє значення зменшується за певним законом $M=M(t)$. Тоді в кожний заданий момент часу експлуатації маємо нормальний закон розподілу випадкової величини з відомими числовими характеристиками. Якщо середнє значення характеристики міцності зменшується в часі, її коефіцієнт варіації буде зростати. Аналогічним чином можна описати зростання в часі міцності бетону чи збільшення середньої густини теплоізоляційного матеріалу внаслідок поступового заповнення пор водою.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – підрозділ 6.5
- [4] – сторінка 136
- [5] – практичне заняття № 3
- [13] – сторінки 35 – 40

6.6 Імовірнісні моделі навантажень і впливів експлуатаційного середовища

Імовірнісні моделі, які використовуються для опису навантажень і впливів експлуатаційного середовища, повинні відповідати таким вимогам:

- адекватно й досить точно відображати досліджене навантаження;
- мати достатнє інформаційне забезпечення для визначення усіх параметрів;
- не вимагати обробки великих обсягів даних для визначення параметрів;
- забезпечувати можливість визначення необхідних розрахункових значень;
- бути максимально простими у використанні.

Імовірнісна модель **розподілу випадкової величини** використовується для опису постійних та змінних тривалих навантажень, які практично не змінюються в часі. Найчастіше використовується нормальний закон розподілу (2.8), що обумовлено сумарним впливом на величину навантаження багатьох випадкових факторів. Для подання навантаження у вигляді нормального розподілу достатньо визначити його середнє значення й стандарт. Зазвичай це робиться шляхом статистичної обробки результатів спостереження за навантаженням. Подання постійного чи змінного тривалого навантаження у формі розподілу випадкової величини дозволяє встановлювати експлуатаційні, граничні та квазіпостійні розрахункові значення.

Імовірнісна модель розподілу випадкової величини поточних результатів спостереження за навантаженням використовується також для визначення експлуатаційних і квазіпостійних розрахункових значень змінних навантажень. Граничні розрахункові значення за цією моделлю можуть оцінюватися лише в тому випадку, коли суміжні в часі результати спостережень є незалежними. Для цього використовують розріджені вибірки, дані яких істотно віддалені в часі. Закони розподілу змінних навантажень часто відрізняються від нормального.

При оцінюванні показників надійності імовірнісна модель розподілу випадкової величини використовується для опису постійних та змінних тривалих навантажень, а також при аналізі відмов-перешкод, що відповідають переходу через граничні стани другої групи.

Імовірнісна модель **стаціонарного випадкового процесу** повною мірою враховує частотну структуру процесу змінного навантаження чи впливу. Для її визначення необхідно задати незмінні в часі статистичні характеристики: математичне сподівання $M=\text{const}$, стандарт $S=\text{const}$ або коефіцієнт варіації $V=\text{const}$, коефіцієнти асиметрії $A=\text{const}$ та ексцесу $E=\text{const}$ (при необхідності, залежно від виду закону розподілу) та ефективну частоту $\omega=\text{const}$. Вид закону розподілу ординати обирається за результатами аналізу даних з урахуванням фізичної суті процесу навантаження, а його параметри визначаються через згадані числові характеристики.

Модель стаціонарного випадкового процесу використовується для імовірнісного опису вертикальних і горизонтальних навантажень від мостових кранів, технологічних температур конструкцій в цехах з надлишковими виділеннями тепла, пульсацій швидкості вітру не невеликих проміжках часу та деяких інших навантажень і впливів на будівельні конструкції. Вона дозволяє не лише виконувати розрахунки показників надійності, але й встановлювати розрахункові значення навантажень усіх видів: експлуатаційні, граничні, циклічні та квазіпостійні. В деяких випадках (наприклад, при нормальному розподілі ординати) можна отримати замкнуті аналітичні рішення. При більш складних законах розподілу ординати процесу навантаження задачі розрахунку надійності та нормування навантажень розв'язуються чисельно.

Недоліком імовірнісної моделі стаціонарного випадкового процесу є те, що вона не може врахувати й описати сезонні чи інші подібні зміни характеристик, які притаманні кліматичним навантаженням і впливам.

Квазістаціонарний випадковий процес дозволяє виконати імовірнісний опис більшості кліматичних навантажень і впливів. Його особливістю є річний період нестационарності, який задається функціями числових характеристик і відображає сезонні зміни, притаманні атмосферним навантаженням і впливам. Приклади реалізацій випадкового процесу зміни середньодобової температури атмосферного повітря наведені на рисунку 6.10.

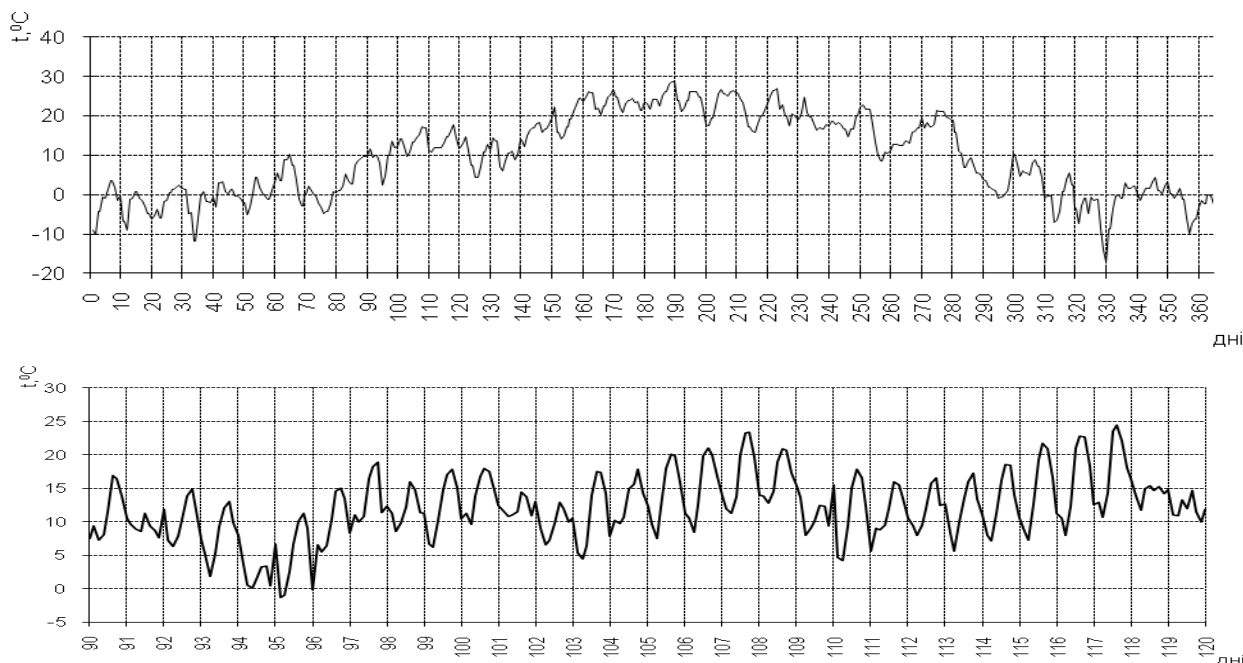


Рис. 6.10 Реалізації випадкового процесу температури атмосферного повітря

Наведена на першому рисунку річна реалізація відображає явно виражену нестационарність процесу, обумовлену сезонними змінами температури. Другий рисунок, на якому наведений фрагмент реалізації для квітня місяця, вказує на виражені добові коливання температури повітря та випадкові міждобові зміни.

З нього видно, що протягом короткого відрізка часу (тиждень, декада, місяць) статистичні характеристики температури змінюються неістотно, що дозволяє реальний нестационарний процес зміни температури на цьому відрізку часу вважати стаціонарним. Така модель дозволяє розділити річний цикл на місячні відрізки і на кожному з них оперувати з дослідженим процесом навантаження, як зі стаціонарним випадковим процесом, що спрощує розрахунки надійності.

Для опису кліматичних навантажень і впливів у формі квазістаціонарного випадкового процесу задаються функції математичного сподівання $M(t)$, стандарту $S(t)$ та коефіцієнта асиметрії $A(t)$ у вигляді апроксимуючих аналітичних функцій або послідовностей з 12 місячних значень, а також постійне в часі значення ефективної частоти ω . Вид закону розподілу ординати обирається залежно від виду навантаження чи впливу, а його параметри в довільний момент часу протягом року визначаються через функції числових характеристик $M(t)$, $S(t)$ і $A(t)$. В результаті отримують змінну в часі густину $f(x, t)$ та інтегральну функцію розподілу ординати $F(x, t)$.

Дослідження показали, що для снігового та вітрового навантажень коефіцієнт варіації та коефіцієнт асиметрії наближено можна вважати постійними протягом усього року, а для випадкового процесу температури атмосферного повітря можна виразити їх через математичне сподівання. Це дозволяє спростити імовірнісну модель квазістаціонарного випадкового процесу, звівши її до визначення ефективної частоти, функції математичного сподівання та постійних значень інших параметрів чи їх залежностей від математичного сподівання.

Імовірнісна модель квазістаціонарного випадкового процесу дозволяє вести розрахунки надійності з урахуванням терміну експлуатації конструкцій та сезонної мінливості навантажень, а також визначати розрахункові значення змінних навантажень усіх видів (граничні, експлуатаційні, циклічні та квазіпостійні). Недоліком цієї моделі є складність математичного апарату, яка зазвичай обумовлює необхідність використання чисельних рішень.

Послідовність максимальних значень навантаження за характерні проміжки часу є спрощеною схемою подання випадкового процесу у вигляді розподілу випадкової величини. Для її розроблення реалізація процесу навантаження розділяється на рівні відрізки Δt (рік, місяць, доба тощо), величина яких повинна забезпечувати незалежність ординат, віддалених на цей інтервал. Схема формування послідовності річних максимумів снігового навантаження наведена на рисунку 6.11. На кожному річному інтервалі вибирається максимальне протягом зими значення ваги снігового покриву (відмічене на рисунку жирною горизонтальною лінією) і таким чином формується послідовність максимумів, яку можна вважати вибіркою незалежних даних.

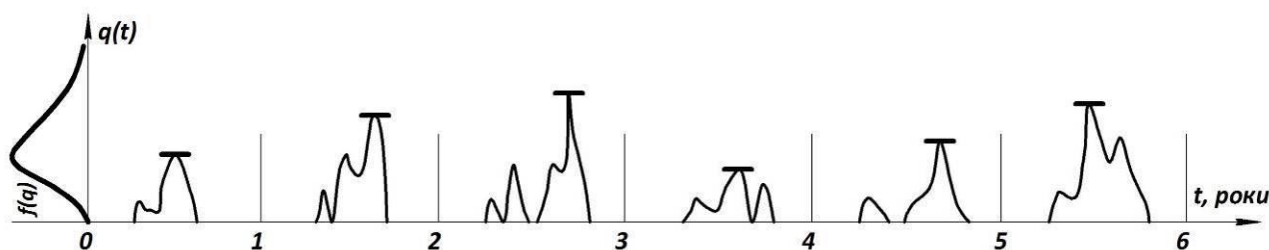


Рис. 6.11 Формування розподілу річних максимумів ваги снігового покриву

Отримана вибірка максимумів описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля (2.13), (2.15), густина якого зображена зліва від осі ординат. Параметри розподілу Гумбеля визначаються за формулами (2.14), або більш точними формулами (5.3) і (5.4). Завдяки рівномірності поділу на часові інтервали вибірка максимумів зберігає інформацію про часову характеристику. Наприклад, розрахункове значення з імовірністю перевищення $1/10$ перевищується в одному випадку з десяти, тобто один раз на 10 років.

Закон розподілу Гумбеля дозволяє легко перейти від розподілу максимуму за один рік з математичним сподіванням M_1 і стандартом S_1 до максимуму навантаження за строк служби T з відповідними характеристиками:

$$M_T = M_1 + 0,78 \times S_1 \times \ln(T); \quad S_T = S_1. \quad (6.9)$$

Формули (6.9) дозволяють використовувати імовірнісну модель послідовності максимальних значень при оцінюванні показників надійності за критерієм виходу за граничні стани першої групи з урахуванням встановленого терміну експлуатації конструкцій T .

Окрім того, імовірнісна модель послідовності максимальних значень широко використовується при нормуванні граничних розрахункових значень змінних навантажень, які можуть перевищуватися в середньому один раз на T років, завдяки своїй простоті та можливості явного урахування часу.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – підрозділ 6.5
- [3] – сторінки 11 – 14
- [4] – сторінки 83 – 90, 95 – 99
- [5] – практичні заняття № 4, 5, 6
- [10] – сторінки 24 – 34
- [13] – сторінки 57 – 79

Розділ 7

ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

7.1 Оцінювання безвідмовності елементів несучих конструкцій при постійних силових впливах

Постійними силовими впливами можна вважати дію постійних та тривалих змінних навантажень, які реалізуються при зведенні об'єкта і майже не змінюються під час експлуатації. Кожне i -те навантаження можна описати імовірнісною моделлю нормально розподіленої випадкової величини з густиною імовірності $f_{qi}(x)$, математичним сподіванням M_{qi} та стандартом S_{qi} .

Сумарний навантажувальний ефект (зусилля в елементі чи напруження в перерізі) від дії усіх навантажень також відповідають нормальному закону розподілу $f_q(x)$ з числовими характеристиками

$$M_q = \sum_i \alpha_i M_{qi}; \quad S_q = \sqrt{\sum_i \alpha_i^2 S_{qi}^2}, \quad (7.1)$$

де α_i – коефіцієнти впливу, які забезпечують перехід від величини i -того навантаження до навантажувального ефекту від його дії.

Несуча здатність елемента (чи показник міцності матеріалу) також описується нормальним законом розподілу $f_r(x)$ з математичним сподіванням M_r та стандартом S_r . Числові характеристики розподілу несучої здатності отримують шляхом множення математичного сподівання й стандарту показника міцності на геометричну характеристику поперечного перерізу та інші параметри, що відповідають виду деформації елемента. Відповідно до вибору показника несучої здатності, задачу оцінювання надійності можна розв'язувати в просторі напружень чи в просторі внутрішніх зусиль в елементі.

Графіки густини розподілів сумарного навантажувального ефекту (зусилля чи напруження) та несучої здатності елемента (показника міцності матеріалу) наведені на рисунку 7.1. Там же відмічена зона перетину графіків густини розподілу навантажувального ефекту й несучої здатності, у якій може не виконуватися гранична нерівність (6.4). Реалізація події $\{q > r\}$ призводить до відмови елемента, що й позначено на графіку літерою Q , яка символізує імовірність відмови елемента конструкції.

Для зручності обчислення імовірності відмови та імовірності безвідмовної роботи вводиться величина резерву несучої здатності елемента чи перерізу, яка в роботах А.Р. Ржаніцина [4] була названа резервом міцності. **Резерв несучої здатності** є випадковою величиною, рівною $s = r - q$. Умовою безвідмовної роботи елемента є його достатня несуча здатність, яка забезпечується при $s > 0$. Згідно з теоремами про числові характеристики

випадкових величин, математичне сподівання та стандарт резерву несучої здатності можна обчислити за формулами

$$M_s = M_r - M_q = M_r - \sum_i \alpha_i M_{qi}; \quad S_s = \sqrt{S_r^2 + S_q^2} = \sqrt{S_r^2 + \sum_i \alpha_i^2 S_i^2}. \quad (7.2)$$

Відповідна крива густини нормального розподілу резерву несучої здатності $f_s(x)$ також зображена на рисунку 7.1.

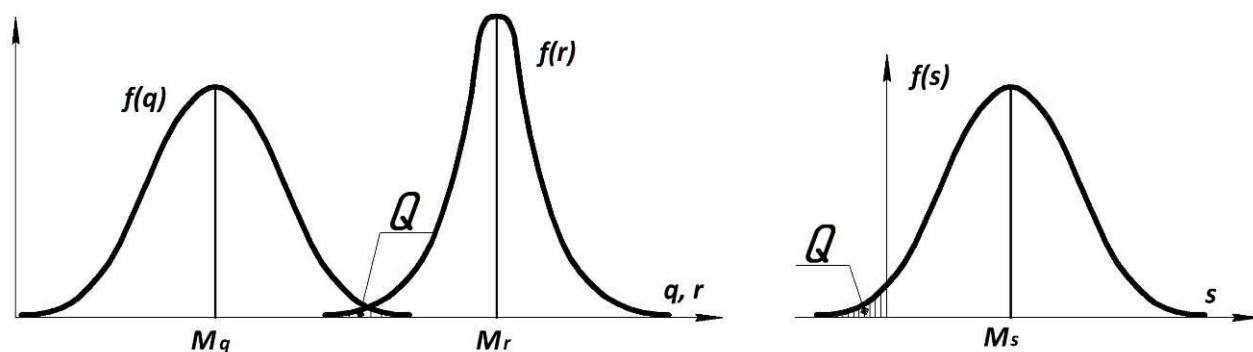


Рис. 7.1 Схема обчислення імовірності відмови за розподілами несучої здатності, навантажувального ефекту та резерву несучої здатності елемента

Дальність відмови (аргумент функції нормального розподілу при значенні $s = 0$) дорівнює $t_s = M_s / S_s$, а імовірність відмови визначається за таблицею А.3 нормального розподілу для великих t_s , або за функцією Excel *НОРМ.СТ.РАСП* (t_s), як імовірність від'ємних значень резерву несучої здатності

$$Q = \int_{-\infty}^0 f_s(x) dx, \quad (7.3)$$

що й показано на рисунку 7.1. Імовірність безвідмовної роботи дорівнює

$$P = 1 - Q = \int_0^{\infty} f_s(x) dx. \quad (7.4)$$

Оскільки постійні навантаження й міцність матеріалу реалізуються один раз в момент зведення об'єкта і не змінюються в процесі експлуатації, за формулами (7.3) і (7.4) отримуємо показники початкової надійності, тобто імовірність відмови при завершенні зведення об'єкта. Імовірність безвідмовної роботи також не прив'язана до терміну експлуатації, оскільки навантаження та показник міцності не змінюються в часі.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – додаток В
- [4] – сторінки 58 – 60
- [5] – практичне заняття № 7
- [13] – сторінки 109 – 113

7.2 Оцінювання безвідмовності елементів несучих конструкцій при змінних силових впливах

Для адекватного оцінювання надійності змінні навантаження повинні бути представлені в формі випадкових процесів. Зокрема, кліматичні навантаження можуть бути описані імовірнісною моделлю квазістаціонарного випадкового процесу з річним періодом нестационарності та досить складними законами розподілу ординати. У такому випадку для визначення імовірності відмови елемента чи розрахункового перерізу несучої конструкції необхідно перетворити випадкові процеси навантажень у випадкові процеси зусиль чи напружень в елементі чи перерізі конструкції та визначити суму цих процесів. Імовірність відмови дорівнює частоті перетинів квазістаціонарним випадковим процесом сумарного зусилля в елементі чи напруження в перерізі випадкового рівня несучої здатності елемента чи міцності матеріалу. При реальних законах розподілу ординати процесів навантаження описана процедура є досить складною, а тому реалізується чисельними методами.

Спрощений метод оцінювання надійності базується на поданні випадкових процесів навантажень у вигляді послідовностей максимальних значень за характерні проміжки часу, які описуються випадковими величинами із законом розподілу Гумбеля. Ця імовірнісна модель використовується також для нормування кліматичних навантажень і впливів. Звичайно розглядають річні максимуми ваги снігового покриву, місячні максимуми тиску вітру та добові чи декадні максимуми кранового навантаження. Такий підхід дозволяє оперування з випадковими процесами замінити на оперування з випадковими величинами, не виключаючи з розгляду час експлуатації за рахунок відомої періодичності вибірок максимальних значень навантажень.

Для розрахунку імовірності відмови необхідні такі вихідні величини:

M_r , S_r – математичне сподівання й стандарт характеристики міцності;

M_{qp} , S_{qp} – математичне сподівання й стандарт постійного навантаження;

M_{qi} , S_{qi} , τ_i – математичні сподівання, стандарти та періодичності вибірок максимумів змінних навантажень (у роках);

α_p , α_i – коефіцієнти впливу постійного та змінних навантажень,

які забезпечують перехід від навантаження до напружень в перерізі;

T – строк служби конструкції в роках.

Перехід від розподілу максимумів змінних навантажень за час τ_i до максимуму за увесь строк служби T здійснюється на основі відомої властивості закону розподілу Гумбеля, згідно з якою при зростанні періодичності вибірки максимумів стандарт розподілу S_{qi} залишається незмінним, а математичне сподівання зростає за залежністю

$$M_{qi}(T) = M_{qi} + 0,78 S_{qi} \ln(T / \tau_i). \quad (7.5)$$

Подібно до розрахунку надійності при постійних силових впливах, статистичні характеристики резерву несучої здатності за період експлуатації конструкції обчислюються за формулами:

$$M_s = M_r - \alpha_p M_p - \sum_i \alpha_i [M_{qi} + 0,78 S_{qi} \ln(T / \tau_i)];$$

$$S_s = \sqrt{S_r^2 + \alpha_p^2 S_p^2 + \sum_i \alpha_i^2 S_i^2}, \quad (7.6)$$

де складова $0,78 S_{qi} \ln(T / \tau_i)$ забезпечує перехід від максимуму i -того навантаження за період τ_i до максимуму за строк служби конструкції T згідно з формулою (6.9).

Схема визначення імовірності відмови за описаною методикою наведена на рисунку 7.2. На рисунку показано, що крива густини розподілу максимуму навантаження за один інтервал вибірки $f(q,1)$ при переході до максимуму за увесь строк служби $f(q,T)$ зміщується в область більших навантажень. Зона перетину областей визначення максимуму навантаження за строк служби $f(q,T)$ та несучої здатності елемента $f(r)$ визначає величину імовірності відмови Q .

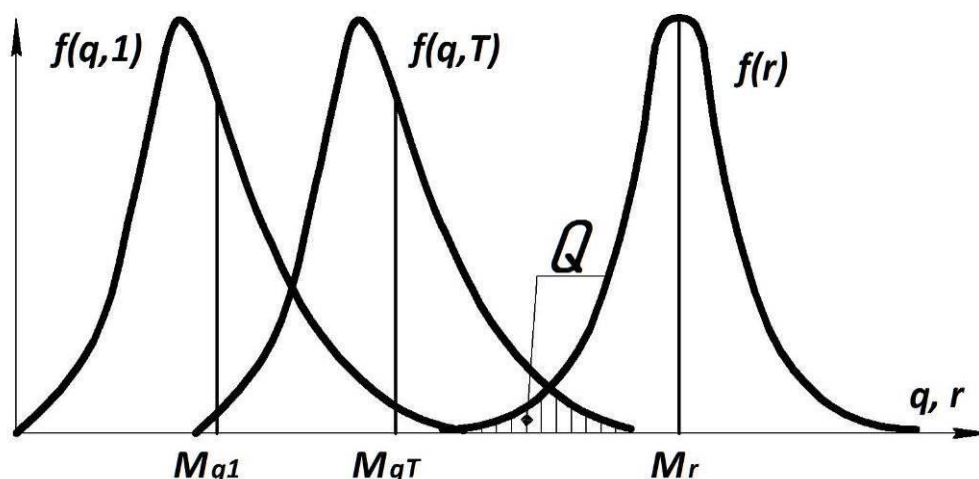


Рис. 7.2 Схема обчислення імовірності відмови при змінних силових впливах, представлених послідовностями максимальних значень

Закон розподілу резерву несучої здатності має асиметричну форму, проміжну між розподілом Гумбеля та нормальним розподілом. Враховуючи нормалізацію в результаті додавання й віднімання декількох випадкових величин при визначенні резерву несучої здатності за формулами (7.6), його розподіл можна вважати близьким до нормального. Тоді **дальність відмови** дорівнює $t_s = M_s / S_s$, а імовірності відмови та безвідмовної роботи протягом строку служби T визначаються за таблицею нормального розподілу А.3 або за функцією Excel $NORM.ST.PACPI(t_s)$, як імовірності від'ємних чи додатних значень резерву несучої здатності:

$$Q(T) = \int_{-\infty}^0 f_s(x) dx; \quad P(T) = 1 - Q(T) = \int_0^{\infty} f_s(x) dx. \quad (7.7)$$

Змінюючи строк служби конструкції T , за формулами (7.6) і (7.7) можна збудувати функцію надійності розрахованого елемента $P(T)$ та залежність імовірності відмови від терміну експлуатації $Q(T)$.

Рекомендовані джерела інформації:

- [1] – додаток В
- [4] – сторінки 74 – 76, 79 – 83
- [5] – практичне заняття № 7
- [13] – сторінки 109 – 113

7.3 Оцінювання надійності огорожувальних конструкцій за критерієм теплопровідності

Вимоги до теплових характеристик огорожувальних конструкцій нормуються в ДБН В.2.6-31:2006 "Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель", де встановлено три критерії теплової надійності:

$$R_{\Sigma \text{пр}} \geq R_{q \text{ min}}, \quad (7.8)$$

$$\Delta t_{\text{пр}} \leq \Delta t_{\text{сг}}, \quad (7.9)$$

$$\tau_{\text{в min}} > t_{\text{min}}, \quad (7.10)$$

де $R_{\Sigma \text{пр}}$ – приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції в $\text{м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$;

$R_{q \text{ min}}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції в $\text{м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$, яке визначається за ДБН В.2.6-31:2006 залежно від температурної зони експлуатації будинку;

$\Delta t_{\text{пр}}$ – температурний перепад між температурами внутрішнього повітря і внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{\text{сг}}$ – допустима за санітарно-гігієнічними вимогами різниця між температурою внутрішнього повітря і температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$\tau_{\text{в min}}$ – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

t_{min} – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції (точка роси) при розрахункових значеннях температур внутрішнього й зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

В термінах методу граничних станів вирази (7.8) – (7.10) слід вважати граничними нерівностями. Нерівність (7.8) обмежує теплопередачу через огороження, нерівність (7.9) виражає умову комфортності перебування поряд з огорожувальною конструкцією, а нерівність (7.10) гарантує відсутність конденсації вологи з повітря в приміщенні на внутрішній поверхні стіни.

Теплотехнічні характеристики будівельних матеріалів і температурні впливи атмосферного середовища мають випадковий характер. Це обумовлює необхідність використання імовірнісних методів оцінювання показників теплової надійності огорожувальних конструкцій шляхом аналізу імовірності виконання граничних нерівностей (7.8) – (7.10).

Методики імовірнісного оцінювання показників теплової надійності за описаними критеріями базуються на таких передумовах:

- використовуються граничні нерівності (7.8) – (7.10), розрахункові методи і формули, наведені в ДБН В.2.6-31:2006;
- коефіцієнти теплопровідності матеріалів λ_i вважаються нормально розподіленими випадковими величинами, а товщини шарів огорожувальної конструкції δ_i – випадковими або детермінованими величинами;
- температура зовнішнього повітря τ_z є квазістаціонарним випадковим процесом або послідовністю нормально розподілених випадкових величин, що відповідають окремим місяцям року;
- температура повітря в приміщенні τ_v вважається детермінованою величиною, яка встановлюється згідно з вимогами ДБН В.2.6-31:2006;
- коефіцієнти внутрішньої α_v та зовнішньої тепловіддачі α_z вважаються детермінованими величинами, які приймають за ДБН В.2.6-31:2006;
- мінімально допустиме значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції R_{\min} є детермінованою величиною, прийнятою згідно з вимогами ДБН В.2.6-31:2006 зі зміною від липня 2014 року.

Результати випробувань плит з мінеральної вати та пінополістиролу показали, що їх коефіцієнти теплопровідності мають коефіцієнти варіації в межах від 0,08 до 0,15. Контрольні значення коефіцієнтів теплопровідності, наведені в стандартах на матеріали, відповідають забезпеченості 0,9 – 0,95.

Статистичні характеристики опору теплопередачі огорожувальної конструкції, яка складається з N шарів (несуча конструкція, утеплювач, внутрішнє та зовнішнє оздоблення тощо) визначаються, виходячи з відомої формули ДБН В.2.6-31:2006

$$R_0 = \alpha_v + \alpha_z + \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (7.11)$$

усі позначення в якій наведені вище. Враховуючи нелінійну операцію ділення

випадкових величин δ_i і λ_i в формулі (7.11), статистичні характеристики результуючої випадкової величини R_o визначаються відомим методом лінеаризації функції випадкових величин (7.11). Згідно з методом лінеаризації, математичне сподівання й стандарт опору теплопередачі дорівнюють

$$M_{R0} = \alpha_b + \alpha_3 + \sum_{i=1}^N \frac{M_{\delta i}}{M_{\lambda i}} ; \quad S_{R0} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{S_{\delta i}}{M_{\lambda i}} \right)^2 + \left(\frac{S_{\lambda i} M_{\delta i}}{M_{\lambda i}^2} \right)^2 \right]} , \quad (7.12)$$

де N – кількість шарів огорожувальної конструкції;

$M_{\delta i}$ та $S_{\delta i}$ – математичне сподівання й стандарт товщини i -того шару;

$M_{\lambda i}$ та $S_{\lambda i}$ – математичне сподівання й стандарт коефіцієнта теплопровідності i -того шару;

інші позначення наведені вище.

Імовірність теплової відмови за критерієм недостатнього опору теплопередачі дорівнює імовірності того, що випадкова величина фактичного опору теплопередачі буде меншою за встановлене нормами мінімально допустиме значення опору теплопередачі R_{\min} :

$$Q = P\{R_o < R_{\min}\} = F_R(R_{\min}) , \quad (7.13)$$

де $F_R(\dots)$ – функція нормального розподілу опору теплопередачі з математичним сподіванням і стандартом (7.12);

R_{\min} – мінімально допустиме значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції за ДБН В.2.6-31:2006.

Імовірність відмови (7.13) можна вважати часткою площі поверхні огорожувальної конструкції, термічний опір якої не відповідає вимогам норм, тобто часткою площі стіни, яка має недостатній рівень теплової надійності.

Для оцінювання імовірності теплової відмови за критеріями комфортності (7.9) та точки роси (7.10) необхідно отримати статистичні характеристики випадкового процесу температури внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції через статистичні характеристики квазістаціонарного випадкового процесу температури зовнішнього атмосферного повітря та теплотехнічні характеристики огороження. Оскільки останні є випадковими величинами, а в товщі огороження відбувається затухання коливань температури на зовнішній поверхні, ця задача є досить складною. В даний час її можна розв'язати лише наближено, в основному шляхом чисельного моделювання випадкового процесу теплопередачі через конкретну огорожувальну конструкцію.

Рекомендовані джерела інформації:

[3] – сторінки 268 – 270

[10] – сторінки 105 – 114

7.4 Розрахункове оцінювання довговічності будівельних конструкцій і виробів

За визначенням ДБН [1], під **довговічністю** розуміють властивість будівельних матеріалів, виробів і конструкцій зберігати роботоздатний стан до настання граничного стану в заданих умовах експлуатації. Перехід у позаграничний стан звичайно відбувається внаслідок **деградаційних відмов**, обумовлених процесами старіння, зношування, корозії, втоми тощо при дії деструктивних впливів експлуатаційного середовища.

Як правило, деградаційні відмови фіксуються за ознакою перевищення контрольованим параметром певної граничної межі (величина зношування бетонної підлоги, ступінь зменшення маси виробу чи міцності матеріалу при випробуваннях на морозостійкість тощо). Відмови такого характеру будемо називати **ресурсними**. У деяких випадках можна встановити чітко виражені ознаки відмов. Наприклад, наскрізне стирання фактурного шару лінолеуму чи ламінату, з якого виготовлена підлога, повне руйнування зразка при випробуваннях на морозостійкість тощо. Відмови такого характеру будемо називати **явними**.

Прогнозування довговічності будівельних конструкцій і виробів слід виконувати методами теорії надійності з урахуванням імовірнісного характеру властивостей матеріалів та впливів експлуатаційного середовища. Параметри деструктивних впливів експлуатаційного середовища зазвичай можна виміряти і подати у формі випадкових процесів, наприклад процесів зменшення маси та міцності виробу внаслідок втрати морозостійкості, зношування через стирання матеріалу. Так процеси повинні враховувати як інтенсивність деструктивного впливу експлуатаційного середовища, так і здатність матеріалу, виробу чи конструкції чинити опір цьому впливу.

Досить інформативним показником довговічності є **гамма-відсотковий ресурс**, рівний наробітку, протягом якого з імовірністю γ (у відсотках) об'єкт не досягне граничного стану (відмова не виникне). Більш зручним для практичного використання показником є **гамма-відсотковий строк служби T_γ** , рівний календарному періоду експлуатації, впродовж котрого з ймовірністю γ (у процентах) об'єкт не досягне граничного стану. Якщо розглядається множина виробів, то гамма-відсотковий строк служби можна вважати гарантованим строком служби, протягом якого зберігається працездатність $100 \times \gamma$ % виробів. Для переходу від гамма-відсоткового наробітку до гамма-відсоткового (гарантованого) строку служби будівельного матеріалу чи виробу необхідно шляхом дослідження інтенсивності ушкоджуючого експлуатаційного впливу перейти від величини наробітку до календарного терміну експлуатації.

Гарантований строк служби будівельних матеріалів, виробів і конструкцій можна визначати за методом, близьким до методики оцінювання надійності будівельних конструкцій, коли ліва частина граничної нерівності, яка описує зовнішній силовий вплив на конструкцію, порівнюється з правою частиною, яка описує несучу здатність цієї конструкції. У нашому випадку необхідно записати граничну нерівність у просторі стандартизованого ресурсу виробу, отриманому в стандартних умовах випробувань (шлях стиранності на стандартному крузі для дослідження бетону чи на абразивному барабані для випробування лінолеуму, стандартні цикли заморожування-відтавання тощо).

Принципові схеми накопичення пошкоджень від експлуатаційного впливу наведені на рисунках 6.6, 6.7 і 7.3, де вздовж осі абсцис відкладений час експлуатації, а вздовж осі ординат – стандартизовані значення наробітку та ресурсу виробу. У цих координатах зображені реалізації неспадаючого випадкового процесу накопичення пошкоджень (збільшення наробітку) для окремих виробів і детерміноване значення (рис. 6.6, 6.7) та густина (рис. 7.3) розподілу ресурсу виробу. Для окремого виробу з детермінованою характеристикою опору матеріалу r та конкретною реалізацією випадкового процесу накопичення деструктивного впливу експлуатаційного середовища $q(t)$, котрі виділені на рисунку 7.3 жирними лініями, розв'язок граничної нерівності $q(t) \leq r$ відносно t дає шуканий строк служби виробу.

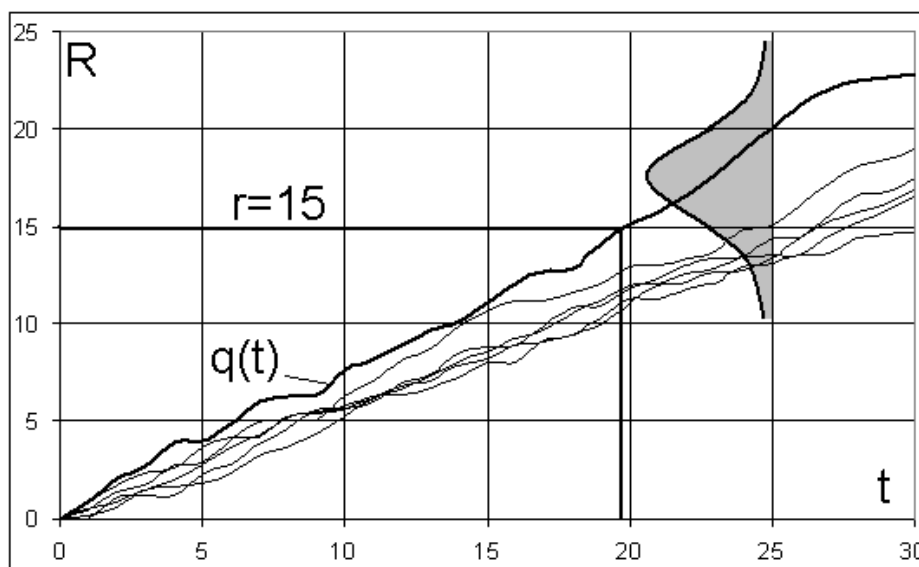


Рис. 7.3 Схема накопичення експлуатаційних пошкоджень

У загальному випадку процедура оцінювання гамма-відсоткового строку служби зводиться до зіставлення випадкового процесу накопичення деструктивного впливу експлуатаційного середовища $Q(t)$ з випадковим значенням опору матеріалу R цьому впливові

$$Q(t) \leq R. \quad (7.14)$$

З рисунка 7.3 зрозуміло, що в цьому випадку можна говорити лише про імовірність виконання нерівності (7.14), а розв'язок відносно t при заданій імовірності γ виконання нерівності (7.14) є шуканим гамма-відсотковим ресурсом чи гарантованим строком служби виробу T_γ . Методика розв'язування подібних рівнянь в основному розроблена в теорії надійності будівельних конструкцій [7] і базується на визначенні кількості викидів нестационарного випадкового процесу накопичення ушкоджуючого впливу за випадковий рівень показника опору матеріалу.

Права частина граничної нерівності (7.14) відображає показник опору матеріалу (опір стиранності, показник морозостійкості тощо) у формі розподілу випадкової величини. Це стандартизований ресурс виробу, який можна отримати за результатами масових випробувань зразків стандартними методами незалежно від лівої частини нерівності (7.14).

Ліва частина граничної нерівності (7.14) відображає умови експлуатації будівельного матеріалу чи виробу та подається у формі неспадаючого випадкового процесу накопичення стандартизованої величини наробітку, рівного сумарній величині деструктивного впливу експлуатаційного середовища на матеріал або виріб у заданих умовах експлуатації протягом певного часу. Наприклад, при прогнозуванні довговічності за критерієм морозостійкості наробіток дорівнює кількості стандартних циклів заморожування-відтавання матеріалу, при прогнозуванні довговічності бетону за критерієм стиранності наробіток дорівнює сумарному шляху зразка на стандартному крузі стиранності.

Проблема оцінювання стандартизованого наробітку полягає в тому, що загальноприйняті стандартні методи випробувань не відповідають реальним умовам експлуатації будівельних матеріалів і виробів. Якщо стандартні випробування морозостійкості вимагають заморожування матеріалу, повністю насиченого водою, до температури -18°C , то в реальних умовах експлуатації пори матеріалу можуть бути насичені не повністю, а температура й тривалість циклу заморожування зазвичай не відповідають стандартним значенням. Стандартні випробування на стиранність на чавунному крузі, барабані зі шліфувальною шкуркою чи на інших пристроях узагалі носять умовний характер, а їх результати можуть використовуватися лише для порівняння опору стиранності матеріалів одного виду. В умовах реальної експлуатації характеристики об'єктів, що рухаються по поверхні покриття підлоги або дороги, (підшви взуття, автомобільні шини тощо), швидкість та характер їх переміщення відносно поверхні, тиск на поверхню й інші параметри процесу стиранності також не відповідають стандартним умовам випробувань.

Тому ліва частина граничної нерівності (7.14) повинна оцінюватися шляхом натурних експериментально-статистичних досліджень ушкоджуючого впливу в реальних умовах експлуатації, за результатами яких встановлюється залежність для переходу до процесу накопичення стандартизованого наробітку чи експлуатаційних пошкоджень виробу. Найскладнішим елементом цієї роботи є перехід від реального до стандартизованого показника наробітку. Так, наприклад, статистичні характеристики випадкового процесу кількості проходів людей по даній ділянці підлоги можна встановити шляхом натурних спостережень, але перехід від кількості проходів людей до еквівалентного за ушкоджуючим впливом стандартизованого шляху стираності є складним багатофакторним завданням. Реальним шляхом його розв'язання можуть стати порівняльні експериментальні дослідження стираності різних матеріалів стандартними методами та стираності в умовах реальної експлуатації.

В якості прикладу наведемо результати оцінювання довговічності тротуарної плитки за критерієм втрати морозостійкості. Тротуарні плитки заводського виробництва виготовлені шляхом вібраційного ущільнення у формах (далі – лита плитка) і вібраційного пресування (далі – вібропресована плитка). Середні значення наробітку до відмови (марки за морозостійкістю) приблизно дорівнюють F 100 для литої плитки та F 200 для вібропресованої. Великий розкид значень показника морозостійкості обумовлює коефіцієнти варіації наробітку до відмови $V_F=0,40$ і $V_F=0,33$. Реальні значення показника морозостійкості окремих плиток можуть бути як набагато більшими, так і в 2 – 3 рази меншими від отриманих марок F 100 та F 200.

Вважаючи, що плитка працює в режимі, близькому до повного насичення водою, а цикл заморожування-відтавання реалізується при падінні температури плитки нижче нуля з наступним нагріванням до плюсової температури, обчислені значення гамма-відсоткового строку служби в кліматичних умовах різних міст України. Аналіз метеорологічних даних показав, що в умовах обраних міст середньорічні кількості циклів заморожування-відтавання тротуарної плитки змінюються в досить вузьких межах: від 10,1 до 11,7 1/рік.

На рисунку 7.4 зображені залежності гамма-відсоткового строку служби плитки (гарантованого строку служби) від γ . Вони утворюють два компактні пучки кривих, верхній із яких відповідає вібропресованій плитці, а нижній – литій. Таким чином, гарантований строк служби тротуарної плитки T_γ практично не залежить від географічного району України, а визначається видом плитки та заданим рівнем забезпеченості γ .

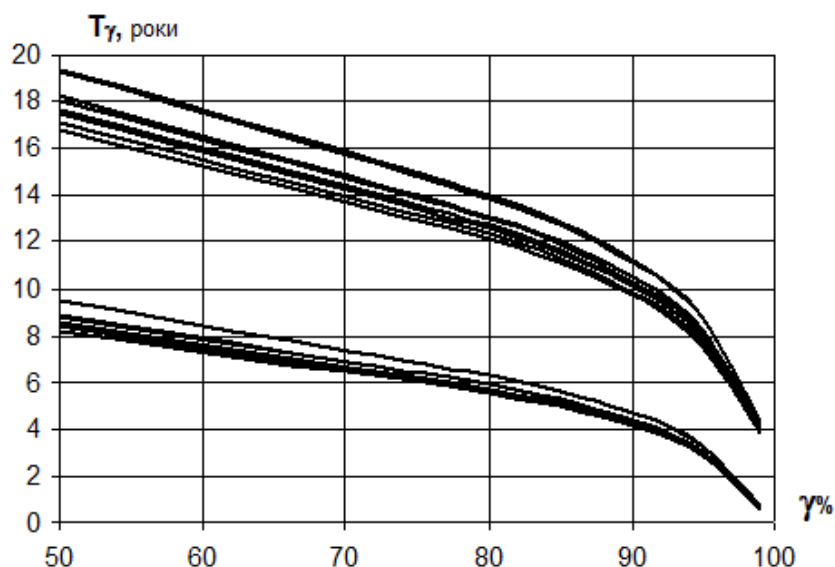


Рис. 7.4 Гама-відсотковий ресурс тротуарної плитки

З рисунка видно, що підвищення рівня забезпеченості γ приводить до різкого зменшення гарантованого строку служби плитки T_γ . Якщо при $\gamma=0,5$ середній строк служби литої плитки складає 8...9 років, а вібропресованої – 17...19 років, то при $\gamma=0,95$ (гарантується 95% незруйнованої плитки) значення ресурсу зменшуються відповідно до 3...4 та 8...9 років. Загалом вібропресована плитка удвічі довговічніша за литу, що цілком підтверджується практикою експлуатації тротуарних покриттів.

Рекомендовані джерела інформації:

[4] – сторінки 76 – 78

[13] – сторінки 129 – 133

7.5 Оцінювання показників довговічності за результатами випробувань

Експериментальні методи оцінювання показників надійності та довговічності використовуються при дії на матеріали чи вироби деструктивних процесів, вплив яких неможливо або надто складно передбачити розрахунком. При цьому можуть реалізовуватися дві схеми проведення експериментальних досліджень, описані нижче.

Випробування вибірки однотипних зразків з метою безпосереднього визначення наробітку до відмови чи строку служби кожного зразка. Така методика лабораторних випробувань використовується по відношенню до недорогих зразків будівельних матеріалів чи виробів, кожен з яких можна довести до стану явної відмови протягом порівняно невеликого часу

випробувань. В якості прикладу наведемо випробування на морозостійкість до повного руйнування зразків. Випробування проводяться за стандартною методикою (заморожування повністю насичених водою зразків до температури -18° з наступним відтаванням), але кількість зразків обирається достатньо великою для виконання статистичної обробки та отримання закону розподілу наробітку до відмови (кількості стандартних циклів заморожування-відтавання до руйнування зразка).

З метою зменшення загальної тривалості експерименту використовують прискорені методи випробувань. Наприклад, заморожування зразків, насичених замість води соляним розчином, до температури -50°C зменшує необхідну кількість циклів заморожування-відтавання приблизно у 10 разів. При цьому випробування тротуарної плитки, яка повинна мати марку за морозостійкістю не нижчу за F 200, реально можна провести протягом двох тижнів чи місяця.

Отриману в результаті випробувань вибірку наробітків чи термінів експлуатації до відмови зразків аналізують звичайними методами математичної статистики. Результатом статистичної обробки є числові характеристики та закон розподілу наробітку чи терміну експлуатації до відмови з густиною імовірності $f(T)$ та інтегральною функцією розподілу $F(T)$. За отриманим законом розподілу можна оцінити гамма-відсотковий наробіток чи термін експлуатації до відмови (гарантований строк служби) T_{γ} , як розв'язок рівняння

$$1 - \gamma = F(T_{\gamma}) . \quad (7.15)$$

Залежно від виду отриманого закону розподілу, рівняння (7.15) може розв'язуватися аналітично або чисельними методами.

Визначення характеристик процесу зношування матеріалів, виробів чи конструкцій в певних умовах експлуатації. Такі дослідження виконуються в лабораторних умовах, або шляхом спостереження за станом будівельних конструкцій чи виробів в умовах реальної експлуатації. Модель таких досліджень зображена на рисунку 7.5.

В процесі експлуатації проводиться декілька вимірювань величини зношування Δ серії однотипних об'єктів при різних наробітках чи термінах експлуатації t_1, t_2, t_3 та інших. За їх результатами отримують закони розподілу величини зношування $f(\Delta, t_1), f(\Delta, t_2), f(\Delta, t_3) \dots$, що відповідають різним наробіткам чи термінам експлуатації досліджених об'єктів. За результатами таких випробувань (як правило, лабораторних) процес зношування можна подати у формі нестационарного випадкового процесу накопичення пошкоджень, реалізації якого зображені на рисунку 7.5.

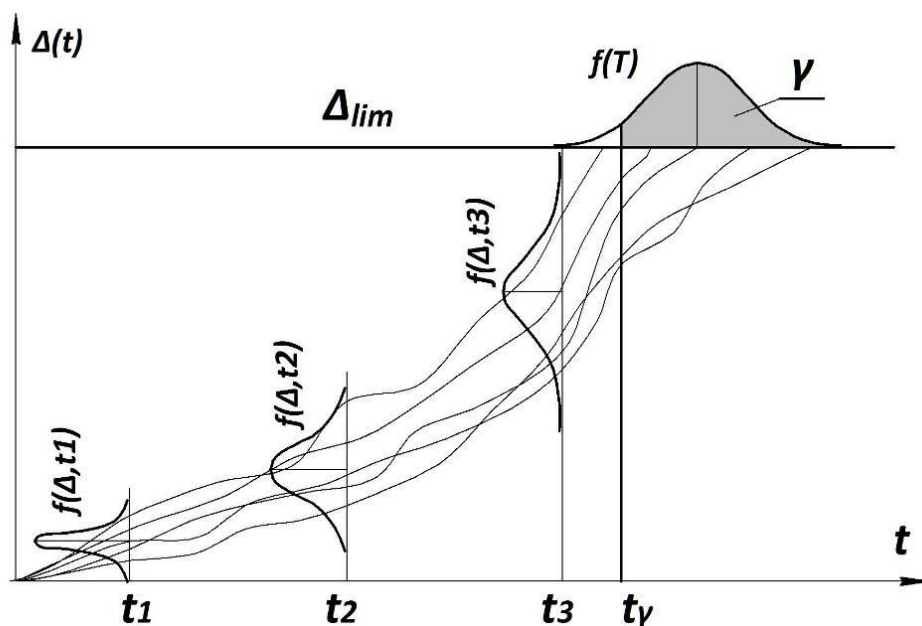


Рис. 7.5 Нестационарний процес накопичення експлуатаційних пошкоджень

Схема формування розподілу наробітку чи терміну експлуатації до відмови досліджених об'єктів наведена на рисунку 7.5. Для оцінювання гамма-відсоткового строку служби необхідно розв'язувати задачу про викиди нестационарного випадкового процесу накопичення пошкоджень $\Delta(t)$ за встановлений допустимий рівень Δ_{lim} , що є досить складним завданням.

Якщо у процесі експлуатації проводиться лише одне спостереження за станом серії однотипних об'єктів при певній величині наробітку чи терміну експлуатації, за його результатами встановлюється закон розподілу швидкості зношування на базі лінійної моделі накопичення пошкоджень, схема якої наведена на рисунку 7.6.

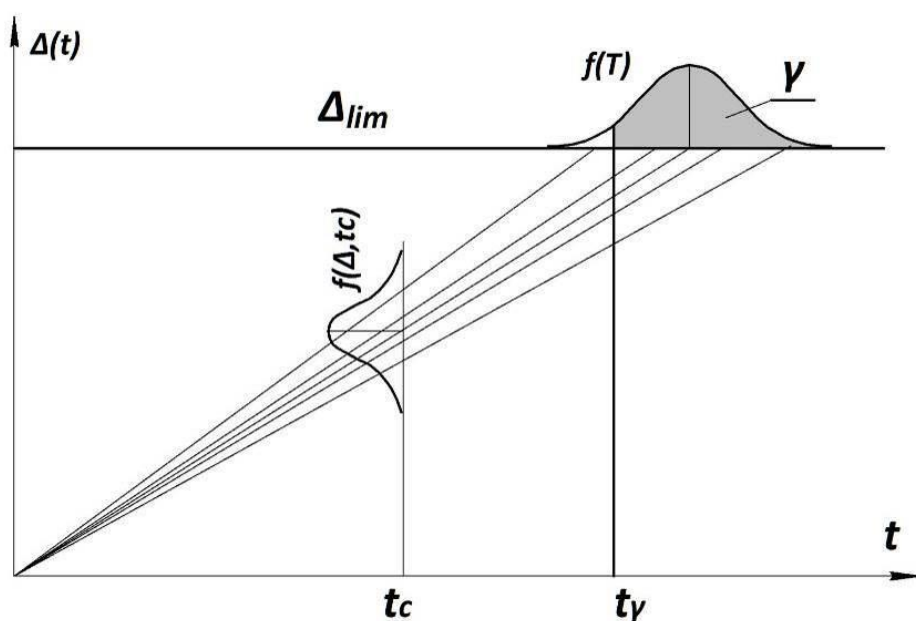


Рис. 7.6 Лінійна модель накопичення експлуатаційних пошкоджень

В якості прикладу можна навести визначення глибини корозійних пошкоджень елементів сталевих конструкцій у процесі натурних обстежень. За результатами статистичної обробки даних масових вимірювань глибини корозії в момент спостереження t_c можна побудувати закон розподілу глибини корозії (чи іншого деструктивного процесу зношування) $f(\Delta, t_c)$ в цей момент часу. Вважаючи, що пошкодження розвиваються за лінійним законом, швидкість корозійного зношування кожного елемента можна оцінити за формулою

$$\delta = \Delta / t_c . \quad (7.16)$$

Закон розподілу швидкості корозійного чи іншого зношування $f(\delta)$ має такий же вигляд, як і закон розподілу глибини корозії в момент спостереження $f(\Delta, t_c)$, а його математичне сподівання й стандарт дорівнюють

$$M_\delta = M_\Delta / t_c ; \quad S_\delta = S_\Delta / t_c , \quad (7.17)$$

де M_Δ і S_Δ – середнє значення й стандарт глибини корозії в момент обстеження.

Закон розподілу випадкової величини наробітку чи терміну експлуатації до відмови $f(T)$ визначається шляхом перетворення розподілу випадкової швидкості накопичення пошкоджень $f(\delta)$ згідно з формулою

$$T = \Delta_{\text{lim}} / \delta , \quad (7.18)$$

де Δ_{lim} – детерміноване або випадкове гранично допустиме значення показника зношування (наприклад, глибини корозії), при перевищенні якого відбувається відмова будівельної конструкції, її елемента чи виробу.

Нелінійне перетворення випадкової величини швидкості зношування δ згідно з (7.18) зазвичай не може бути виконане аналітично, оскільки воно змінює не лише числові характеристики, але й вид закону розподілу $f(\delta)$. Тому для визначення закону розподілу випадкової величини наробітку чи терміну експлуатації до відмови $f(T)$ згідно з (7.18) часто використовуються наближені та чисельні методи (метод лінеаризації функцій випадкових величин, метод чисельного інтегрування густини розподілу, метод Монте-Карло та інші).

Наявність аналітично або таблично заданої густини імовірності $f(T)$ чи інтегральної функції розподілу наробітку (терміну експлуатації до відмови) $F(T)$ дозволяє визначити гамма-відсотковий ресурс (гарантований строк служби) виробу чи конструкції з формули (7.15).

Рекомендовані джерела інформації:

[4] – сторінки 11 – 13, 26 – 37

[5] – практичне заняття № 8

7.6 Поняття про показники надійності технічних систем

Будівельні конструкції, як і інші технічні системи, складаються з елементів, що взаємодіють між собою. Найпростіші схеми взаємодії можна представити у вигляді послідовного та паралельного з'єднання елементів (по аналогії з електричними освітлювальними приладами).

Схеми послідовного і паралельного з'єднання елементів зображені на рисунку 7.7. Якщо уявити собі протікання струму чи води через ці елементи, стає зрозумілим, що відмова одного з послідовно з'єднаних елементів приводить до повної відмови системи. При паралельному з'єднанні відмова одного з елементів залишає систему працездатною (хоча й менш ефективною), і лише відмова всіх елементів призводить до повної відмови системи.

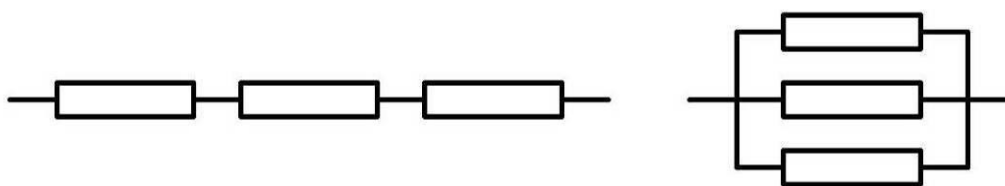


Рис. 7.7 Схеми з'єднання елементів у системі

Під послідовним (в імовірнісному сенсі) з'єднанням розуміють таку взаємодію елементів, при якій відмова одного елемента приводить до відмови усієї системи. Тоді імовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добуткові імовірностей безвідмовної роботи усіх елементів

$$P = \prod_{i=1}^N P_i = (P_i)^N; \quad Q = 1 - P. \quad (7.19)$$

Під паралельним (в імовірнісному сенсі) з'єднанням розуміють таку взаємодію елементів, при якій відмова системи відбувається лише у випадку відмови всіх елементів. Тоді імовірність відмови системи дорівнює добуткові імовірностей відмови усіх елементів

$$Q = \prod_{i=1}^N Q_i = (Q_i)^N; \quad P = 1 - Q. \quad (7.20)$$

Другі частини формул (7.19) і (7.20) описують систему з рівнонадійними елементами. Для цього випадку виконаємо чисельні розрахунки імовірностей відмови систем з різними кількостями елементів, кожен з яких має імовірність відмови $Q_i=0,99$:

Тип з'єднання елементів системи	Імовірність відмови системи при кількості елементів					
	1	5	10	20	50	100
Послідовне	0,01	0,049	0,096	0,182	0,395	0,634
Паралельне	0,01	1E-10	1E-20	1E-40	1E-100	1E-200

З таблиці видно, що при послідовному з'єднанні рівень надійності істотно зменшується зі збільшенням кількості елементів системи. Паралельне з'єднання елементів навпаки, різко підвищує рівень надійності системи. Це явище використовують з метою підвищення надійності за рахунок включення в систему резервних елементів та підсистем. З метою оптимального резервування (досягнення максимуму надійності при мінімумі витрат) використовують комбіновані схеми послідовно-паралельного з'єднання елементів, показники надійності яких обчислюються на основі формул (7.19) і (7.20).

Взаємодія елементів будівельних конструкцій загалом не відповідає описаним вище типам з'єднань, які широко використовуються при оцінюванні надійності електронних систем. Досить близькими до послідовного з'єднання є статично визначені конструкції, у яких відмова одного з елементів призводить до відмови усієї системи унаслідок перетворення її в механізм. Найближчим, але також не зовсім точним прикладом може бути ферма. Її відмінність від системи з послідовним з'єднанням елементів полягає у тому, що відмови окремих стержнів ферми є залежними, оскільки усі стержні синхронно завантажуються одним і тим же навантаженням. Тому імовірність відмови статично визначеної ферми не можна точно оцінити за формулою (7.19). Вона є чимось середнім між імовірністю відмови (7.19) системи послідовно з'єднаних стержнів та імовірністю відмови найслабкішого стержня.

Схема резервування реалізується в статично невизначених конструкціях, які мають надлишкову кількість стержнів, в'язей чи опор. Для оцінювання імовірності відмови статично невизначених конструкцій формула (7.20) непридатна, оскільки вона не враховує залежності відмов окремих елементів унаслідок синхронної дії одних і тих же навантажень та зміни розрахункової схеми конструкції при відмові кожного елемента. Тому оцінювання надійності статично невизначених будівельних конструкцій є складною науковою задачею, яку неможливо розв'язати на базі використання класичних схем з'єднання елементів та відповідних їм формул.

Рекомендовані джерела інформації:

[4] – сторінки 155 – 158

[13] – сторінки 177 – 185

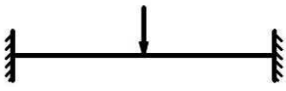

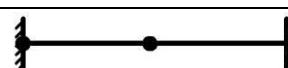



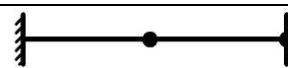
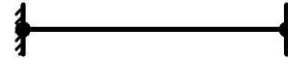

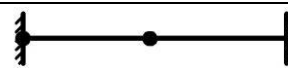
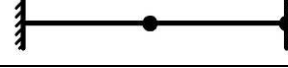
7.7 Проблема оцінювання надійності статично невизначених несучих будівельних конструкцій

У випадку статично невизначених конструкцій, де реалізується принцип резервування елементів, їх не можна вважати системами паралельно з'єднаних елементів. Хоча відмова одного елемента не приводить до відмови усієї конструкції, але вона перерозподіляє зусилля в елементах і таким чином змінює імовірності їх відмови. Конструкція з одним зруйнованим елементом – це вже інша конструкція, яка вимагає нового розрахунку надійності усіх елементів. Відмова наступного елемента знову змінює розрахункову схему конструкції та імовірності відмови усіх елементів. У деяких випадках значне зростання імовірностей відмови елементів може призвести до лавиноподібного руйнування конструкції задовго до її перетворення в механізм.

Можливу послідовність відмов елементів статично невизначеної конструкції продемонструємо на прикладі жорстко обпертої балки, яка має три ступені статичної невизначеності. Елементами цієї системи будемо вважати три найбільш навантажені перерізи: два на опорах і третій – в середині прольоту. Відмовою елемента є виникнення шарніра пластичності. Послідовності змін розрахункових схем – від тричі статично невизначеної балки до механізму з трьома пластичними шарнірами, що відповідає повній відмові конструкції, показані в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

Послідовності відмов елементів статично невизначеної балки

Початкова схема	Відмова одного елемента	Відмова двох елементів	Відмова системи
			
			
			
			
			
			

З наведених схем видно, що навіть найпростіший приклад є досить складним завданням. Розглянута балка може перебувати в семи різних працездатних станах (одна схема з трьома ступенями статичної невизначеності, три схеми з двома ступенями статичної невизначеності та три статично

визначені конструкції), перехід у які може здійснюватися різними шляхами за рахунок різної послідовності розвитку пластичних шарнірів. Для кожного з семи працездатних станів балки необхідно провести повний комплекс розрахунків (визначення згинальних моментів та імовірностей відмови усіх елементів), після чого можна перейти до оцінювання показників надійності системи в цілому.

Описаний метод розрахунку надійності статично невизначених конструкцій називають методом перебору працездатних станів. З ростом складності системи та ступеня її статичної невизначеності зростає також кількість можливих працездатних станів та варіантів послідовності виникнення відмов окремих елементів. Це настільки сильно ускладнює розрахунок, що може зробити його нереально громіздким навіть при умові використання сучасної обчислювальної техніки. Виходом з положення є пошук і аналіз найімовірніших шляхів руйнування (послідовностей розвитку відмов елементів). Такий підхід був практично реалізований в деяких наукових дослідженнях, але задачу аналізу надійності статично невизначених будівельних конструкцій все ще не можна вважати розв'язаною.

Рекомендовані джерела інформації:

[4] – сторінки 158 – 161, 165 – 168

[13] – сторінки 186 – 198

7.8 Приклад оцінювання надійності прогону покрівлі при дії постійного та снігового навантаження

В результаті обстеження виробничої будівлі у м. Маріуполь встановлено, що прогони покрівлі мають таку конструкцію: проліт прогону – 6 м, крок прогонів – 3 м, переріз – швелер 18У. Покрівля виконана зі сталевго профільованого настилу, утеплена плитами з мінеральної вати товщиною близько 50 мм і покрита гідроізоляційним шаром з руберойду на мастиці.

У процесі обстеження відібрані проби сталі, за результатами випробування яких у підрозділі 1.8 встановлені статистичні характеристики межі текучості та розрахунковий опір. Пробиті шурфи в покрівлі, з яких вилучені та зважені усі матеріали, окрім профільованого настилу. За результатами статистичної обробки в підрозділі 4.6 встановлені статистичні характеристики навантаження від ваги покрівлі та його граничне розрахункове значення. За результатами снігомірних зйомок на метеостанції м. Маріуполь у підрозділі 5.10 отримані залежності граничного розрахункового значення снігового навантаження від періоду повторюваності, а також його

характеристичне значення. Результати проведеної статистичної обробки наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2

Статистичні характеристики розрахункових параметрів прогону покрівлі

Розрахункові параметри	M	S	Розрахункові значення
Характеристика міцності (МПа)	341	43,1	$R_y=238$ МПа
Постійне навантаження (Па)	577	81,1	$Q_m=624$ Па
Снігове навантаження (Па)	247	178	$S_0=709$ Па
при $T=20$ років			$S(20)=582$ Па
при $T=50$ років			$S(50)=709$ Па
при $T=100$ років			$S(100)=805$ Па
при $T=150$ років			$S(150)=861$ Па
при $T=200$ років			$S(200)=901$ Па

Необхідно виконати перевірку міцності сталевих прогоно покрівлі з урахуванням розрахункових параметрів, отриманих в результаті обстеження й наведених у таблиці 7.2, визначити імовірність відмови прогону за критерієм міцності при різних термінах експлуатації, збудувати функцію надійності та проаналізувати вплив терміну експлуатації на рівень надійності.

Розв'язання поставленої задачі базується на встановленій чинними нормами проектування сталевих конструкцій процедурі перевірки міцності при згині, на методиці ймовірнісного розрахунку надійності, викладеній у підрозділі 7.2 та в методичних вказівках до практичних занять [5] на підставі додатку В ДБН В.1.2-14 [1]. Розрахунки виконуються в такій послідовності:

1. Визначається сумарне граничне розрахункове значення розподіленого навантаження від снігу та власної ваги покрівлі для залишкового терміну експлуатації $T=50$ років

$$Q = Q_m + S_m = 624 + 709 = 1333 \text{ Па},$$

погонне навантаження на прогін при крокові 3 м

$$q = Q \times b = 1333 \times 3 = 3999 \text{ Н/м} = 4,00 \text{ кН/м},$$

та згинальний момент у прогоні, як у балці на двох шарнірних опорах

$$M = \frac{q \times l^2}{8} = \frac{4,00 \times 6^2}{8} = 18,00 \text{ (кН} \times \text{м)}.$$

2. Згідно з вказівками ДБН В.2.6-163:2010 "Сталеві конструкції" виконується перевірка міцності прогону за формулою:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{1800}{121} = 14,9 \text{ кН / см}^2 = 149 \text{ МПа} \leq R_y = 238 \text{ МПа}$$

Виявлений при перевірці запас міцності складає 37%, що є наслідком значного зниження розрахункового значення снігового навантаження.

3. За результатами виконаного перевірконого розрахунку визначається коефіцієнт впливу постійного та снігового навантаження

$$\alpha_c = \alpha_{\Pi} = \sigma/Q = 149/1333 = 0,112.$$

4. Для термінів експлуатації конструкції $T = 20, 50, 100, 150, 200$ років у середовищі Excel визначаються середнє значення й стандарт резерву міцності за формулами, отриманими на основі формул (7.6)

$$M = M_r - \alpha_{\Pi} M_{\Pi} - \alpha_c (M_c + 0,78 S_c \ln T); \quad S = \sqrt{S_r^2 + \alpha_{\Pi}^2 S_{\Pi}^2 + \alpha_c^2 S_c^2}$$

де M_R і S_R – середнє значення й стандарт границі текучості сталі з табл. 7.2;

M_{Π} і S_{Π} – середнє значення й стандарт постійного навантаження з табл. 7.2;

M_R і S_R – середнє значення й стандарт снігового навантаження з табл. 7.2;

$\ln T$ – натуральний логарифм строку служби конструкції.

5. Для усіх термінів експлуатації визначається дальність відмови $\beta = M/S$, імовірність відмови $P_B(T)$ за таблицею А.3 або за функцією Excel $HORMPASP(0, M, S, 1)$ та імовірність безвідмовної роботи $P_H(T) = 1 - P_B(T)$. Результати обчислень за пунктами 4,5 заносяться до таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

Визначення функції надійності прогону покрівлі

Строк служби T (роки)	Характеристики резерву міцності		Дальність відмови β	Імовірність відмови $P_B(T)$	Надійність $P_H(T)$
	M	S			
20	203	48,3	4,20	1,341E-05	0,999987
50	189	48,3	3,91	4,697E-05	0,999953
100	178	48,3	3,68	1,148E-04	0,999885
150	172	48,3	3,55	1,896E-04	0,999810
200	167	48,3	3,46	2,680E-04	0,999732

При збільшенні терміну експлуатації з 20 років до 200 років імовірність відмови зростає з 0,000013 до 0,000268, тобто у 20 разів. Отримана для залишкового терміну експлуатації $T=50$ років імовірність відмови $4,7 \times 10^{-5}$ практично відповідає рекомендованому за ДБН В.1.2-14-2009 [1] значенню $5,0 \times 10^{-5}$ для прогонів (категорія відповідальності конструкції – В) у будівлях класу відповідальності СС2 при розрахунках за першою групою граничних станів в усталеній розрахунковій ситуації.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

О с н о в н а :

1. ДБН В.1.2-14-2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. К.: Мінрегіонбуд України, 2009.- 30 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. К.: Мінбуд України, 2007.- 60 с.
3. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лашенко, В.А. Пашинський, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин; Под общей ред. А.В. Перельмутера. – М.: ИАСВ, 2007. – 482 с.
4. Ржаницин А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. - М.: Стройиздат. – 1978. – 240 с.
5. Основи теорії надійності будівель і споруд. Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності "Промислове та цивільне будівництво" усіх форм навчання. Укладач Пашинський В.А. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – 37 с.

Д о д а т к о в а :

6. ДБН 362-93. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Держбуд України.- К.: Укранхбудінформ, 1995. – 46 с.
7. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1981, 351 с.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
9. Заварина М.В. Строительная климатология. М.: 1977. – 312 с.
10. Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції на території України. – К.: УкрНДІПСК, 1999.– 185 с.
11. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций.- К.: 1999.- 210 с.
12. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: монография. – Полтава: ООО "АСМИ", 2009. – 452 с.
13. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. - М.: - 1998. – 304 с.

Додаток А

СТАТИСТИЧНІ ТАБЛИЦІ

Таблиця А.1. Функція нормального розподілу
(наведені лише десяткові знаки після коми)

t	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	50000	50398	50797	51196	51595	51993	52392	52790	53188	53585
0,1	53982	54379	54775	55171	55567	55961	56355	56749	57142	57534
0,2	57925	58316	58706	59095	59483	59870	60256	60641	61026	61409
0,3	61791	62171	62551	62930	63307	63683	64057	64430	64802	65173
0,4	65542	65909	66275	66640	67003	67364	67724	68082	68438	68793
0,5	69146	69497	69846	70194	70540	70884	71226	71566	71904	72240
0,6	72574	72906	73237	73565	73891	74215	74537	74857	75174	75490
0,7	75803	76114	76423	76730	77035	77337	77637	77935	78230	78523
0,8	78814	79103	79389	79673	79954	80233	80510	80784	81057	81326
0,9	81594	81858	82121	82381	82639	82894	83147	83397	83645	83891
1,0	84134	84375	84613	84849	85083	85314	85542	85769	85992	86214
1,1	86433	86650	86864	87076	87285	87492	87697	87899	88099	88297
1,2	88493	88686	88876	89065	89251	89435	89616	89795	89972	90147
1,3	90319	90490	90658	90824	90987	91149	91308	91465	91620	91773
1,4	91924	92073	92219	92364	92506	92647	92785	92921	93056	93188
1,5	93319	93447	93574	93699	93821	93942	94062	94179	94294	94408
1,6	94520	94630	94738	94844	94949	95052	95154	95254	95352	95448
1,7	95543	95636	95728	95818	95907	95994	96079	96163	96246	96327
1,8	96406	96485	96562	96637	96711	96784	96855	96925	96994	97062
1,9	97128	97193	97257	97319	97381	97441	97500	97558	97614	97670
2,0	97724	97778	97830	97882	97932	97981	98030	98077	98123	98169
2,1	98213	98257	98299	98341	98382	98422	98461	98499	98537	98573
2,2	98609	98644	98679	98712	98745	98777	98808	98839	98869	98898
2,3	98927	98955	98982	99009	99035	99061	99086	99110	99134	99157
2,4	99180	99202	99223	99245	99265	99285	99305	99324	99343	99361
2,5	99379	99396	99413	99429	99445	99461	99476	99491	99505	99520
2,6	99533	99547	99560	99573	99585	99597	99609	99620	99631	99642
2,7	99653	99663	99673	99683	99692	99702	99710	99719	99728	99736
2,8	99744	99752	99759	99767	99774	99781	99788	99794	99801	99807
2,9	99813	99819	99824	99830	99835	99841	99846	99851	99855	99860
3,0	99865	99869	99873	99877	99881	99885	99889	99892	99896	99899
3,1	99903	99906	99909	99912	99915	99918	99921	99923	99926	99928
3,2	99931	99933	99935	99938	99940	99942	99944	99946	99948	99949
3,3	99951	99953	99954	99956	99958	99959	99961	99962	99963	99965
3,4	99966	99967	99968	99969	99970	99971	99972	99973	99974	99975
3,5	99976	99977	99978	99979	99979	99980	99981	99982	99982	99983
3,6	99984	99984	99985	99985	99986	99986	99987	99987	99988	99988
3,7	99989	99989	99990	99990	99990	99991	99991	99991	99992	99992
3,8	99992	99993	99993	99993	99993	99994	99994	99994	99994	99994
3,9	99995	99995	99995	99995	99995	99996	99996	99996	99996	99996

Таблиця А.2. Критичні значення критерію узгодженості Пірсона

Ступені свободи k	Рівні значимості α				
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	1,64	2,71	3,84	5,41	6,64
2	3,22	4,60	5,99	7,82	9,21
3	4,64	6,25	7,82	9,84	11,3
4	5,99	7,78	9,49	11,7	13,28
5	7,29	9,24	11,1	13,4	15,1
6	8,56	10,6	12,6	15,0	16,8
7	9,80	12,0	14,1	16,6	18,5
8	11,0	13,4	15,5	18,2	20,1
9	12,2	14,7	16,9	19,7	21,7
10	13,4	16,0	18,3	21,2	23,2
11	14,6	17,3	19,7	22,6	24,7
12	15,8	18,5	21,0	24,1	26,2
13	16,9	19,8	22,4	25,5	27,7
14	18,2	21,1	23,7	26,9	29,1
15	19,3	22,3	25,0	28,3	30,6
16	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0
17	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4
18	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8
19	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2
20	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6
21	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9
22	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3
23	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6
24	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0
25	30,3	34,4	37,6	41,7	44,3
26	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6
27	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0
28	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3
29	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6
30	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9
35	41,8	46,1	49,8	53,2	57,3
40	47,3	51,8	55,8	59,3	63,7

Таблиця А.3. Імовірність відмови при нормальному розподілі
функція $1-F(x)$

	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	5,0E-01	5,0E-01	4,9E-01	4,9E-01	4,8E-01	4,8E-01	4,8E-01	4,7E-01	4,7E-01	4,6E-01
0,1	4,6E-01	4,6E-01	4,5E-01	4,5E-01	4,4E-01	4,4E-01	4,4E-01	4,3E-01	4,3E-01	4,2E-01
0,2	4,2E-01	4,2E-01	4,1E-01	4,1E-01	4,1E-01	4,0E-01	4,0E-01	3,9E-01	3,9E-01	3,9E-01
0,3	3,8E-01	3,8E-01	3,7E-01	3,7E-01	3,7E-01	3,6E-01	3,6E-01	3,6E-01	3,5E-01	3,5E-01
0,4	3,4E-01	3,4E-01	3,4E-01	3,3E-01	3,3E-01	3,3E-01	3,2E-01	3,2E-01	3,2E-01	3,1E-01
0,5	3,1E-01	3,1E-01	3,0E-01	3,0E-01	2,9E-01	2,9E-01	2,9E-01	2,8E-01	2,8E-01	2,8E-01
0,6	2,7E-01	2,7E-01	2,7E-01	2,6E-01	2,6E-01	2,6E-01	2,5E-01	2,5E-01	2,5E-01	2,5E-01
0,7	2,4E-01	2,4E-01	2,4E-01	2,3E-01	2,3E-01	2,3E-01	2,2E-01	2,2E-01	2,2E-01	2,1E-01
0,8	2,1E-01	2,1E-01	2,1E-01	2,0E-01	2,0E-01	2,0E-01	1,9E-01	1,9E-01	1,9E-01	1,9E-01
0,9	1,8E-01	1,8E-01	1,8E-01	1,8E-01	1,7E-01	1,7E-01	1,7E-01	1,7E-01	1,6E-01	1,6E-01
1	1,6E-01	1,6E-01	1,5E-01	1,5E-01	1,5E-01	1,5E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01
1,1	1,4E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,2E-01	1,2E-01	1,2E-01	1,2E-01
1,2	1,2E-01	1,1E-01	1,1E-01	1,1E-01	1,1E-01	1,1E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	9,9E-02
1,3	9,7E-02	9,5E-02	9,3E-02	9,2E-02	9,0E-02	8,9E-02	8,7E-02	8,5E-02	8,4E-02	8,2E-02
1,4	8,1E-02	7,9E-02	7,8E-02	7,6E-02	7,5E-02	7,4E-02	7,2E-02	7,1E-02	6,9E-02	6,8E-02
1,5	6,7E-02	6,6E-02	6,4E-02	6,3E-02	6,2E-02	6,1E-02	5,9E-02	5,8E-02	5,7E-02	5,6E-02
1,6	5,5E-02	5,4E-02	5,3E-02	5,2E-02	5,1E-02	4,9E-02	4,8E-02	4,7E-02	4,6E-02	4,6E-02
1,7	4,5E-02	4,4E-02	4,3E-02	4,2E-02	4,1E-02	4,0E-02	3,9E-02	3,8E-02	3,8E-02	3,7E-02
1,8	3,6E-02	3,5E-02	3,4E-02	3,4E-02	3,3E-02	3,2E-02	3,1E-02	3,1E-02	3,0E-02	2,9E-02
1,9	2,9E-02	2,8E-02	2,7E-02	2,7E-02	2,6E-02	2,6E-02	2,5E-02	2,4E-02	2,4E-02	2,3E-02
2	2,3E-02	2,2E-02	2,2E-02	2,1E-02	2,1E-02	2,0E-02	2,0E-02	1,9E-02	1,9E-02	1,8E-02
2,1	1,8E-02	1,7E-02	1,7E-02	1,7E-02	1,6E-02	1,6E-02	1,5E-02	1,5E-02	1,5E-02	1,4E-02
2,2	1,4E-02	1,4E-02	1,3E-02	1,3E-02	1,3E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02
2,3	1,1E-02	1,0E-02	1,0E-02	9,9E-03	9,6E-03	9,4E-03	9,1E-03	8,9E-03	8,7E-03	8,4E-03
2,4	8,2E-03	8,0E-03	7,8E-03	7,5E-03	7,3E-03	7,1E-03	6,9E-03	6,8E-03	6,6E-03	6,4E-03
2,5	6,2E-03	6,0E-03	5,9E-03	5,7E-03	5,5E-03	5,4E-03	5,2E-03	5,1E-03	4,9E-03	4,8E-03
2,6	4,7E-03	4,5E-03	4,4E-03	4,3E-03	4,1E-03	4,0E-03	3,9E-03	3,8E-03	3,7E-03	3,6E-03
2,7	3,5E-03	3,4E-03	3,3E-03	3,2E-03	3,1E-03	3,0E-03	2,9E-03	2,8E-03	2,7E-03	2,6E-03
2,8	2,6E-03	2,5E-03	2,4E-03	2,3E-03	2,3E-03	2,2E-03	2,1E-03	2,1E-03	2,0E-03	1,9E-03
2,9	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1,7E-03	1,6E-03	1,6E-03	1,5E-03	1,5E-03	1,4E-03	1,4E-03
3	1,3E-03	1,3E-03	1,3E-03	1,2E-03	1,2E-03	1,1E-03	1,1E-03	1,1E-03	1,0E-03	1,0E-03
3,1	9,7E-04	9,4E-04	9,0E-04	8,7E-04	8,4E-04	8,2E-04	7,9E-04	7,6E-04	7,4E-04	7,1E-04
3,2	6,9E-04	6,6E-04	6,4E-04	6,2E-04	6,0E-04	5,8E-04	5,6E-04	5,4E-04	5,2E-04	5,0E-04
3,3	4,8E-04	4,7E-04	4,5E-04	4,3E-04	4,2E-04	4,0E-04	3,9E-04	3,8E-04	3,6E-04	3,5E-04
3,4	3,4E-04	3,2E-04	3,1E-04	3,0E-04	2,9E-04	2,8E-04	2,7E-04	2,6E-04	2,5E-04	2,4E-04
3,5	2,3E-04	2,2E-04	2,2E-04	2,1E-04	2,0E-04	1,9E-04	1,9E-04	1,8E-04	1,7E-04	1,7E-04
3,6	1,6E-04	1,5E-04	1,5E-04	1,4E-04	1,4E-04	1,3E-04	1,3E-04	1,2E-04	1,2E-04	1,1E-04
3,7	1,1E-04	1,0E-04	1,0E-04	9,6E-05	9,2E-05	8,8E-05	8,5E-05	8,2E-05	7,8E-05	7,5E-05
3,8	7,2E-05	6,9E-05	6,7E-05	6,4E-05	6,2E-05	5,9E-05	5,7E-05	5,4E-05	5,2E-05	5,0E-05
3,9	4,8E-05	4,6E-05	4,4E-05	4,2E-05	4,1E-05	3,9E-05	3,7E-05	3,6E-05	3,4E-05	3,3E-05

Закінчення таблиці В.3

	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
4	3,2E-05	3,0E-05	2,9E-05	2,8E-05	2,7E-05	2,6E-05	2,5E-05	2,4E-05	2,3E-05	2,2E-05
4,1	2,1E-05	2,0E-05	1,9E-05	1,8E-05	1,7E-05	1,7E-05	1,6E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05
4,2	1,3E-05	1,3E-05	1,2E-05	1,2E-05	1,1E-05	1,1E-05	1,0E-05	9,8E-06	9,3E-06	8,9E-06
4,3	8,5E-06	8,2E-06	7,8E-06	7,5E-06	7,1E-06	6,8E-06	6,5E-06	6,2E-06	5,9E-06	5,7E-06
4,4	5,4E-06	5,2E-06	4,9E-06	4,7E-06	4,5E-06	4,3E-06	4,1E-06	3,9E-06	3,7E-06	3,6E-06
4,5	3,4E-06	3,2E-06	3,1E-06	2,9E-06	2,8E-06	2,7E-06	2,6E-06	2,4E-06	2,3E-06	2,2E-06
4,6	2,1E-06	2,0E-06	1,9E-06	1,8E-06	1,7E-06	1,7E-06	1,6E-06	1,5E-06	1,4E-06	1,4E-06
4,7	1,3E-06	1,2E-06	1,2E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,0E-06	9,7E-07	9,2E-07	8,8E-07	8,3E-07
4,8	7,9E-07	7,5E-07	7,2E-07	6,8E-07	6,5E-07	6,2E-07	5,9E-07	5,6E-07	5,3E-07	5,0E-07
4,9	4,8E-07	4,6E-07	4,3E-07	4,1E-07	3,9E-07	3,7E-07	3,5E-07	3,3E-07	3,2E-07	3,0E-07
5	2,9E-07	2,7E-07	2,6E-07	2,5E-07	2,3E-07	2,2E-07	2,1E-07	2,0E-07	1,9E-07	1,8E-07
5,1	1,7E-07	1,6E-07	1,5E-07	1,4E-07	1,4E-07	1,3E-07	1,2E-07	1,2E-07	1,1E-07	1,1E-07
5,2	1,0E-07	9,4E-08	8,9E-08	8,5E-08	8,0E-08	7,6E-08	7,2E-08	6,8E-08	6,5E-08	6,1E-08
5,3	5,8E-08	5,5E-08	5,2E-08	4,9E-08	4,6E-08	4,4E-08	4,2E-08	3,9E-08	3,7E-08	3,5E-08
5,4	3,3E-08	3,2E-08	3,0E-08	2,8E-08	2,7E-08	2,5E-08	2,4E-08	2,3E-08	2,1E-08	2,0E-08
5,5	1,9E-08	1,8E-08	1,7E-08	1,6E-08	1,5E-08	1,4E-08	1,3E-08	1,3E-08	1,2E-08	1,1E-08
5,6	1,1E-08	1,0E-08	9,5E-09	9,0E-09	8,5E-09	8,0E-09	7,6E-09	7,1E-09	6,7E-09	6,4E-09
5,7	6,0E-09	5,6E-09	5,3E-09	5,0E-09	4,7E-09	4,5E-09	4,2E-09	4,0E-09	3,7E-09	3,5E-09
5,8	3,3E-09	3,1E-09	2,9E-09	2,8E-09	2,6E-09	2,5E-09	2,3E-09	2,2E-09	2,1E-09	1,9E-09
5,9	1,8E-09	1,7E-09	1,6E-09	1,5E-09	1,4E-09	1,3E-09	1,3E-09	1,2E-09	1,1E-09	1,0E-09
6	9,9E-10	9,3E-10	8,7E-10	8,2E-10	7,7E-10	7,2E-10	6,8E-10	6,4E-10	6,0E-10	5,6E-10
6,1	5,3E-10	5,0E-10	4,7E-10	4,4E-10	4,1E-10	3,9E-10	3,6E-10	3,4E-10	3,2E-10	3,0E-10
6,2	2,8E-10	2,6E-10	2,5E-10	2,3E-10	2,2E-10	2,1E-10	1,9E-10	1,8E-10	1,7E-10	1,6E-10
6,3	1,5E-10	1,4E-10	1,3E-10	1,2E-10	1,1E-10	1,1E-10	1,0E-10	9,5E-11	8,9E-11	8,3E-11
6,4	7,8E-11	7,3E-11	6,8E-11	6,4E-11	6,0E-11	5,6E-11	5,2E-11	4,9E-11	4,6E-11	4,3E-11
6,5	4,0E-11	3,8E-11	3,5E-11	3,3E-11	3,1E-11	2,9E-11	2,7E-11	2,5E-11	2,4E-11	2,2E-11
6,6	2,1E-11	1,9E-11	1,8E-11	1,7E-11	1,6E-11	1,5E-11	1,4E-11	1,3E-11	1,2E-11	1,1E-11
6,7	1,0E-11	9,7E-12	9,1E-12	8,5E-12	7,9E-12	7,4E-12	6,9E-12	6,4E-12	6,0E-12	5,6E-12
6,8	5,2E-12	4,9E-12	4,6E-12	4,2E-12	4,0E-12	3,7E-12	3,4E-12	3,2E-12	3,0E-12	2,8E-12
6,9	2,6E-12	2,4E-12	2,3E-12	2,1E-12	2,0E-12	1,8E-12	1,7E-12	1,6E-12	1,5E-12	1,4E-12
7	1,3E-12	1,2E-12	1,1E-12	1,0E-12	9,6E-13	8,9E-13	8,3E-13	7,7E-13	7,2E-13	6,7E-13
7,1	6,2E-13	5,8E-13	5,4E-13	5,0E-13	4,7E-13	4,3E-13	4,0E-13	3,8E-13	3,5E-13	3,2E-13
7,2	3,0E-13	2,8E-13	2,6E-13	2,4E-13	2,2E-13	2,1E-13	1,9E-13	1,8E-13	1,7E-13	1,5E-13
7,3	1,4E-13	1,3E-13	1,2E-13	1,2E-13	1,1E-13	9,9E-14	9,2E-14	8,5E-14	7,9E-14	7,3E-14
7,4	6,8E-14	6,3E-14	5,9E-14	5,4E-14	5,0E-14	4,7E-14	4,3E-14	4,0E-14	3,7E-14	3,4E-14
7,5	3,2E-14	3,0E-14	2,7E-14	2,5E-14	2,4E-14	2,2E-14	2,0E-14	1,9E-14	1,7E-14	1,6E-14
7,6	1,5E-14	1,4E-14	1,3E-14	1,2E-14	1,1E-14	1,0E-14	9,3E-15	8,5E-15	8,0E-15	7,3E-15
7,7	6,8E-15	6,3E-15	5,8E-15	5,3E-15	5,0E-15	4,6E-15	4,2E-15	3,9E-15	3,7E-15	3,3E-15
7,8	3,1E-15	2,9E-15	2,7E-15	2,4E-15	2,2E-15	2,1E-15	1,9E-15	1,8E-15	1,6E-15	1,5E-15
7,9	1,4E-15	1,3E-15	1,2E-15	1,1E-15	1,0E-15	9,0E-16	8,6E-16	7,9E-16	7,3E-16	6,8E-16

З М І С Т

В С Т У П.....	3
Розділ 1 Загальні принципи забезпечення надійності будівельних конструкцій.....	5
1.1 Проблема надійності та її значення для сучасного будівництва	5
1.2 Основні поняття, терміни та визначення теорії надійності	8
1.3 Вимоги та засоби забезпечення надійності технічних об'єктів	11
1.4 Метод граничних станів як засіб регулювання надійності будівельних конструкцій	15
1.5 Граничні нерівності та розрахункові параметри методу граничних станів	18
1.6 Імовірнісна природа та принципи нормування розрахункових параметрів методу граничних станів	21
1.7 Нормування характеристик міцності будівельних матеріалів	24
1.8 Приклад визначення розрахункового опору сталі за результатами випробувань зразків.....	27
Розділ 2 Короткі відомості з теорії імовірностей і математичної статистики.....	29
2.1 Базові поняття теорії імовірностей і математичної статистики	29
2.2 Закон розподілу та числові характеристики випадкових величин	30
2.3 Поширені закони розподілу випадкових величин	32
2.4 Поняття про випадкові процеси та поля	35
2.5 Порядок статистичної обробки вибірок випадкових величин	37
2.6 Визначення числових характеристик і побудова гістограми розподілу	39
2.7 Вибір закону розподілу на підставі статистичного аналізу дослідних даних.....	41
2.8 Імовірнісне оцінювання та нормування розрахункових значень	43
2.9 Кореляція та регресія випадкових величин	45
2.10 Приклад статистичної обробки вибірки випадкової величини	49
Розділ 3 Загальні принципи нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції	52
3.1 Класифікація навантажень і впливів на будівельні конструкції	52
3.2 Види розрахункових значень навантажень і впливів на будівельні конструкції	54
3.3 Принципи нормування навантажень і впливів на будівельні конструкції	56
3.4 Загальні методи визначення розрахункових значень змінних навантажень і впливів	58

3.5 Дослідження спільної дії випадкових навантажень на несучі будівельні конструкції	61
3.6 Порядок урахування спільної дії навантажень в нормах проектування	65
Розділ 4 Постійні та технологічні навантаження	68
4.1 Дослідження та нормування постійних навантажень від власної ваги конструкцій.....	68
4.2 Дослідження та нормування технологічних навантажень на перекриття	71
4.3 Фізична природа навантажень від мостових і підвісних кранів	73
4.4 Експериментальні дослідження, імовірнісне подання та нормування кранових навантажень	76
4.5 Навантаження від мостових і підвісних кранів у ДБН В.1.2-2:2006	78
4.6 Приклад визначення постійного навантаження від ваги покрівлі за результатами натурного обстеження	80
Розділ 5 Кліматичні навантаження і впливи.....	82
5.1 Особливості нормування кліматичних навантажень і впливів	82
5.2 Фізична природа та метеорологічні спостереження за сніговим покривом.....	86
5.3 Імовірнісний опис та нормування снігового навантаження	88
5.4 Снігове навантаження в ДБН В.1.2-2:2006.....	90
5.5 Фізична природа та метеорологічні спостереження за вітровим потоком.....	92
5.6 Імовірнісний опис та нормування вітрового навантаження	95
5.7 Вітрове навантаження в ДБН В.1.2-2:2006.....	97
5.8 Дослідження та нормування навантаження від ожеледі в ДБН В.1.2-2:2006	100
5.9 Дослідження та нормування впливу температури повітря на будівлі та несучі конструкції в ДБН В.1.2-2:2006	103
5.10 Приклад нормування снігового навантаження за результатами снігомірних зйомок.....	105
Розділ 6 Показники надійності будівельних конструкцій та принципи їх оцінювання	108
6.1 Класифікація відмов технічних об'єктів.....	108
6.2 Показники надійності та довговічності будівельних конструкцій і виробів.....	110
6.3 Фізичні механізми та моделі відмов будівельних конструкцій і виробів.....	112
6.4 Принципи розрахункового оцінювання показників надійності	117
6.5 Імовірнісне подання властивостей будівельних матеріалів	118
6.6 Імовірнісні моделі навантажень і впливів експлуатаційного середовища.....	121

Розділ 7 Практичні методи оцінювання показників надійності.....	125
7.1 Оцінювання безвідмовності елементів несучих конструкцій при постійних силових впливах.....	125
7.2 Оцінювання безвідмовності елементів несучих конструкцій при змінних силових впливах	127
7.3 Оцінювання надійності огорожувальних конструкцій за критерієм теплопровідності.....	129
7.4 Розрахункове оцінювання довговічності будівельних конструкцій і виробів.....	132
7.5 Оцінювання показників довговічності за результатами випробувань.....	136
7.6 Поняття про показники надійності технічних систем.....	140
7.7 Проблема оцінювання надійності статично невизначених несучих будівельних конструкцій	142
7.8 Приклад оцінювання надійності прогону покрівлі при дії постійного та снігового навантаження.....	143
Рекомендована література	146
Додаток А Статистичні таблиці	147
Таблиця А.1 Функція нормального розподілу	147
Таблиця А.2 Критичні значення критерію узгодженості Пірсона	148
Таблиця А.3 Імовірність відмови при нормальному розподілі	149

Навчальний посібник

ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Укладач – д.т.н., професор Пашинський В.А.

© КНТУ, Кіровоград, пр. Університетський, 8.
© Пашинський В.А.